

Trabajo de Grado

Relación entre los Accidentes Peatonales y la Infraestructura Vial en Santiago de Cali



Realizado por:

David Alejandro Garzón Angarita

Ingeniería Topográfica

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática

Universidad del Valle

Santiago de Cali

2019

**RELACIÓN ENTRE LOS ACCIDENTES PEATONALES Y LA
INFRAESTRUCTURA VIAL EN SANTIAGO DE CALI**

DAVID ALEJANDRO GRAZÓN ANGARITA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
UNIVERSIDAD DEL VALLE
SANTIAGO DE CALI
2019

**RELACIÓN ENTRE LOS ACCIDENTES PEATONALES Y LA
INFRAESTRUCTURA VIAL EN SANTIAGO DE CALI**

DAVID ALEJANDRO GRAZÓN ANGARITA

Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Topográfico

Director:

Jackeline Murillo Hoyos, PhD

Co-director:

Ciro Jaramillo Molina, PhD

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
UNIVERSIDAD DEL VALLE
SANTIAGO DE CALI

2019

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Fecha de entrega:

DEDICATORIA

Dedico esta tesis al Señor de los Milagros de Buga por dejarme entender que la fe y la ciencia pueden ser complementarias, ya que la ciencia puede llegar hasta un punto y luego depende de Dios. Además, por llenar de vida, salud y esperanza a mi familia durante todo este proceso.

A mi madre por hacerme entender que la educación es la verdadera herencia que deben ofrecernos nuestros padres. Así mismo, por entregar todo su amor y energía en la culminación de esta etapa de mi vida.

A mi padre por ofrecer toda su comprensión, afecto y recursos durante toda mi formación. Además, por entregarse completamente a la consecución de este objetivo, viviendo por siempre en mi mente y corazón.

A mis familiares más cercanos: mi hermano y mis tíos por ser fundamentales en el camino de la formación tanto personal como académica. De cada uno de ellos recibí los mejores consejos para mi crecimiento.

A mi novia por ofrecerme todo su amor incondicional, ya que estuvo presente durante los momentos difíciles y nunca me dejó desistir. También, a su familia por abrirme la puerta de su casa y ayudar en el logro de este objetivo.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a la profesora Jackeline Murillo Hoyos y el profesor Ciro Jaramillo Molina por ofrecer todos sus conocimientos, experiencia y consejos en la dirección de este trabajo de grado. Además, por tener siempre el tiempo y la mejor disposición para resolver las inquietudes que se presentaron en el camino, sobre todo, por la paciencia hacia mí persona en los momentos de dificultad.

Mi agradecimiento hacia los compañeros del Grupo de Investigación en Transporte, Tránsito y Vías de la Universidad del Valle por permitirme desarrollar gran parte de mi trabajo de grado en sus instalaciones. Así mismo, agradecer por el tiempo que suministraron para ayudarme a resolver inquietudes relacionadas con el presente trabajo de grado.

Presento mi agradecimiento al ingeniero Jefferson Valencia por la confianza, experiencia y conocimientos ofrecidos tanto directa como indirectamente en el desarrollo del presente trabajo. Además, por ser un facilitador en el desarrollo de mis actividades académicas.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	9
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
2. OBJETIVOS	11
3. JUSTIFICACIÓN	12
4. MARCO CONTEXTUAL	13
4.1 MARCO CONCEPTUAL	13
4.2 MARCO REFERENCIAL	14
4.3 MARCO TEÓRICO	15
5. METODOLOGÍA	25
5.1 ZONA DE ESTUDIO.....	25
5.2 DATOS DE ENTRADA	26
5.3 PROCESAMIENTO DE DATOS	27
5.4 ESTIMACIÓN DE MODELO DE REGRESIÓN GEOGRÁFICAMENTE PONDERADA DE POISSON (GWPR)	31
6. RESULTADOS	32
6.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS ACCIDENTES PEATONALES EN SANTIAGO CALI.....	32
6.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL	46
6.3 RELACIÓN ENTRE LOS ACCIDENTES PEATONALES Y LAS CARACTERÍSTICAS DE INFRAESTRUCTURA VIAL	65
7. CONCLUSIONES	74
8. BIBLIOGRAFÍA	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Método de clasificación natural breaks (Jenks).....	17
Figura 2. Medida de profundidad media para el mapa axial de una red vial: (a) mapa axial (b) niveles de vecindad del arco 1.....	18
Figura 3. Clasificación de patrones de red vial (GI): (a) Grilla, (b) Grilla deforme e (c) Irregular..	19
Figura 4. Clasificación patrones de red vial (CE): (a) Grilla e (b) Irregular	21
Figura 5. Zona de Estudio: Santiago de Cali.	25
Figura 6. Histórico de accidentes peatonales en Santiago de Cali 2008-2013	33
Figura 7. Accidentes peatonales según año y severidad en Santiago de Cali 2008-2013.	34
Figura 8. Accidentes peatonales según mes y severidad en Santiago de Cali 2008-2013.....	34
Figura 9. Accidentes peatonales según día en Santiago de Cali 2008-2013.	35
Figura 10. Accidentes peatonales según franja horaria en Santiago de Cali 2008-2013.....	35
Figura 11. Accidentes peatonales según grupo de edad y sexo en Cali 2008-2013.	36
Figura 12. Accidentes peatonales según escolaridad en Santiago de Cali 2008-2013.	36
Figura 13. Accidentes peatonales según el tipo de servicio que prestan los vehículos	37
Figura 14. Accidentes peatonales según el tipo de vehículos involucrados	37
Figura 15. Mapa de densidades kernel de los accidentes peatonales 2008-2013	39
Figura 16. Mapa de distribución espacial de los accidentes peatonales por barrio 2008-2013.	40
Figura 17. Índice de Moran de accidentes peatonales por barrio durante 2008-2013	41
Figura 18. Mapas del método LISA para accidentes peatonales por barrio en Santiago de Cali: (a) Mapa de significancia (b) Mapa de clúster	42
Figura 19. Mapas de accidentes peatonales según severidad: (a) Lesionados (b) Muertos	43
Figura 20. Mapas de accidentes peatonales según sexo del peatón: (a) Hombres (b) Mujeres	44
Figura 21. Mapa de accidentes peatonales según vehículo involucrado: (a) motocicletas (b) automóviles.	45
Figura 22. Distribución espacial del índice de integración global (GI) por barrio en Santiago Cali	48
Figura 23. Moran para el índice de integración global (GI)	49
Figura 24. Mapa de significancia (a) y clusters (b) para el índice de integración global por barrio	49
Figura 25. Distribución espacial del índice de centralidad entre redes por barrio en Cali	50
Figura 26. Moran para el índice de centralidad entre redes (CE)	51
Figura 27. Mapas de significancia (a) y cluster (b) para el índice de centralidad entre redes	51
Figura 28. Mapa de distribución espacial del número de intersecciones semaforizadas por barrio	52
Figura 29. Moran para el número de intersecciones semaforizadas (NoIS).....	53
Figura 30. Mapa de significancia (a) y clusters (b) para las intersecciones semaforizadas.....	54
Figura 31. Mapa de distribución espacial del número de puntos de parada del sistema MIO	55
Figura 32. Moran para el número de paradas del sistema MIO (NoPPM).....	56
Figura 33. Mapa de significancia (a) y clusters (b) para el número de puntos de parada MIO	56
Figura 34. Mapa de distribución espacial de la velocidad promedio por barrio	57
Figura 35. Moran de la velocidad promedio (Vel) en cada barrio de Santiago de Cali	58
Figura 36. Mapa de significancia (a) y clusters (b) para la velocidad promedio por barrio	59
Figura 37. Mapa de distribución espacial del número de lotes de uso residencial por barrio	60
Figura 38. Moran para el número de lotes con uso residencial (NoLotRes).....	61
Figura 39. Mapa de significancia (a) y clusters (b) para el número de lotes con uso residencial.....	61
Figura 40. Mapa de distribución espacial del número de lotes de uso mixto por barrio	62

Figura 41. Moran para el número de lotes con uso mixto (NoLotMix)	63
Figura 42. Mapa de significancia (a) y clusters (b) para el número de lotes con uso mixto	63
Figura 43. Mapa de uso predominante (residencial o mixto) en cada barrio de Santiago de Cali....	64
Figura 44. Matriz de correlación.	66
Figura 45. Índice de Moran para residuales del modelo GLM	68
Figura 46. Mapa de significancia (a) y clusters (b) de los residuales del modelo GLM	68
Figura 48. Reporte de autocorrelación espacial GWPR	70
Figura 49. Mapa de distribución espacial de residuales del modelo GWPR.....	71
Figura 50. Coeficientes estimados para el índice de centralidad de redes con el modelo GWPR....	72
Figura 51. Coeficientes estimados para número de lotes con uso mixto con el modelo GWPR.....	73

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Nivel de clasificación por cada tipo de patrón vial según el índice de integración global	20
Tabla 2. Nivel de clasificación por cada tipo de patrón vial según el índice de centralidad	21
Tabla 3. Recursos de entrada	26
Tabla 4. Lista de resumen de variables	30
Tabla 5. Resultados de Geo-codificación	32
Tabla 6. Resumen rangos de clasificación por cada variable independiente	46
Tabla 7. Niveles de clasificación según patrones de red vial	47
Tabla 8. Densidad de intersecciones y densidad vial por tipo de patrón de red vial en Cali	47
Tabla 9. Número de lotes por tipo de uso de suelo en Santiago de Cali	59
Tabla 10. Resumen de estadísticas de las variables utilizadas en el presente estudio	65
Tabla 11. Resultados prueba de Jarque-Bera para determinar distribución normal de variables	65
Tabla 12. Combinaciones resultantes de variables a partir de matriz de correlación	66
Tabla 13. Rendimiento de modelos	67
Tabla 14. Resultados modelo GLM (Regresión de Poisson) para M3	67
Tabla 15. Resultados modelo GWPR	69
Tabla 16. Resultados de prueba de variabilidad geográfica	69

RESUMEN

Los accidentes peatonales representan el 22% del total de muertes por accidentes de tránsito a nivel global según la Organización Mundial para la Salud. Este es un fenómeno multicausal que puede estar asociado con el comportamiento humano, el estado de los vehículos y la infraestructura vial. Así mismo, Santiago de Cali es una de las ciudades con mayor número de accidentes peatonales durante los últimos años en Colombia y uno de los principales factores de esta situación es la infraestructura vial según el observatorio de movilidad y seguridad vial de la ciudad. Por tanto, el presente análisis busca identificar la relación entre los accidentes peatonales y la infraestructura vial con el fin de que las autoridades competentes puedan plantear medidas que ayuden a mitigar este fenómeno en la ciudad. Es por esto que se realizó una caracterización de los accidentes peatonales por medio de la geo-codificación de registros, la generación de mapas de densidad de kernel y la agregación de los registros geo-codificados a nivel de barrio, los cuales permiten la identificación de las zonas con mayor accidentalidad de peatones en la ciudad. Posteriormente, se identificarán los factores referentes a la infraestructura vial: patrones de red vial (integración global, centralidad entre redes), facilidades de transporte (intersecciones semaforizadas, puntos de parada MIO), factor operacional (velocidad) y usos del suelo (residencial, mixto). Estos factores de la infraestructura vial son agregados a nivel de barrio y se analizó su distribución espacial a partir de mapas temáticos. Por último, se implementó un modelo de regresión geográficamente ponderado para datos con distribución de Poisson (GWPR), el cual describe la relación entre los accidentes peatonales (variable dependiente) y los factores de infraestructura vial (variables independientes) en Santiago de Cali. Como resultados se obtuvo que las zonas centro y oriente de la ciudad son las que mayor ocurrencia de accidentes peatonales presentaron durante los años 2008 a 2013 en la ciudad, además, según el modelo GWPR los factores que se relacionan significativamente con los accidentes peatonales son la centralidad entre redes y el uso de suelo mixto. El primero se relaciona de forma negativa y el segundo de forma positiva, es decir que los barrios con altos niveles de accidentes peatonales tienden a poseer un patrón de red vial de tipo grilla (centralidad entre redes bajo) y altos valores de uso de suelo mixto, como los barrios del centro de la ciudad. En contraste con los barrios que poseen bajos niveles de accidentes peatonales, los cuales tienden a poseer un patrón de red vial de tipo irregular (centralidad entre redes alto) y bajos niveles de uso de suelo mixto, como los barrios del occidente. En conclusión, se puede afirmar que existe una relación significativa entre algunos de los factores de la infraestructura vial de la ciudad y los accidentes peatonales, ya que se representó en un 0.66% este fenómeno, sin embargo, se debe seguir explorando estas relaciones a partir de más variables.

Palabras clave: accidentes peatonales, infraestructura vial, usos del suelo, regresión geográficamente ponderada, sistemas de información geográfica.

INTRODUCCIÓN

El transporte motorizado trae consigo una serie de impactos negativos tales como: la congestión vehicular, la contaminación ambiental y los accidentes de tránsito. Estos últimos son un fenómeno multicausal que se puede estudiar a partir de un concepto epidemiológico tal como la matriz de Haddon, la cual se fundamenta en tres factores: comportamiento humano, el estado de los vehículos y la infraestructura vial (Medina, 2015). Estos tres factores influyen en la ocurrencia de los accidentes y pueden impactar a cada uno de los actores viales (peatones, ciclistas, motociclistas y conductores). Así mismo, los actores más vulnerables son los peatones, ya que representan el 22% del total de muertes de accidentes de tránsito en el mundo (OMS, 2015). Por lo tanto, los accidentes peatonales constituyen un serio problema de salud pública que requiere atención (Yao, Loo, & Lam, 2015).

Los accidentes peatonales son ocasionados en más del 50% de los casos, por vehículos que conducen a velocidades superiores a los 60 kilómetros por hora en las vías de la ciudad (Abojaradeh, 2013). En el mismo sentido, tener una infraestructura vial con deficiencias aumenta las probabilidades de muerte en accidentes peatonales (Florez & Patiño, 2014). Es decir que la infraestructura vial juega un rol importante en la accidentalidad, ya que el aumento de los flujos de tráfico a través de las redes viales puede afectar la seguridad de los peatones (Zhang, Bigham, Ragland, & Chen, 2015).

En Colombia una de las ciudades con mayor índice de accidentes peatonales es Santiago de Cali, por lo tanto, el presente estudio busca identificar la relación entre los accidentes peatonales y la infraestructura vial en la ciudad, con el fin de responder a preguntas como: cuáles son las zonas de mayor ocurrencia de accidentes peatonales, cuáles son los elementos de la infraestructura vial que influyen en dichas zonas y cómo se podrían relacionar entre sí. En consecuencia, la metodología propuesta en este estudio se basa en métodos de análisis espacial y modelos de regresión geográfica, los cuales tienen en cuenta la variabilidad espacial de los accidentes peatonales, obteniendo resultados más precisos (Zhang, Bigham, Li, & Ragland, 2012).

El proceso metodológico se inicia con la caracterización de los accidentes peatonales por medio de la geo-codificación de registros, generación de mapas de densidad de Kernel y agregación de los registros a nivel de barrio, los cuales permiten la identificación de las zonas con mayor concentración de accidentes de peatones en la ciudad. En segundo lugar, se identifican los factores referentes a la infraestructura vial: patrones de red vial, facilidades de transporte, factor operacional y usos del suelo. Estos factores de la infraestructura vial son agregados a nivel de barrio y se representa su distribución espacial a partir de mapas temáticos. Por último, se implementa un modelo de regresión geográfica (GWR) con el cual se describen los patrones espaciales resultantes de la relación entre los accidentes peatonales (variable dependiente) y los factores de infraestructura vial (variables independientes) en Santiago de Cali.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los accidentes peatonales son un serio problema de salud pública que requiere atención (Yao, Loo, & Lam, 2015). Estos pueden ser estudiados desde un concepto multicausal, el cual tiene en cuenta las conductas inadecuadas tanto de peatones como de conductores, el estado de los vehículos y la infraestructura vial (Medina, 2015). Esta última ha potenciado la movilidad y la eficiencia económica de los países en detrimento de la seguridad vial, particularmente de los usuarios no motorizados (OPS, 2016), quienes a su vez son los usuarios más vulnerables dado que realizan actividades como montar en bicicleta (ciclistas) o caminar (peatones), las cuales son impactadas de forma directa por los flujos de tráfico en las redes viales (Zhang, Bigham, Ragland, & Chen, 2015).

Desplazarse a pie es una actividad cada vez más peligrosa (OMS, 2015). Aproximadamente 400,000 peatones mueren en accidentes de tránsito cada año alrededor del mundo (Guo et.al, 2017). Por lo tanto, los peatones representan uno de los grupos de usuarios de la vía más afectados ya que del total de muertes relacionados con usuarios vulnerables, el 22% corresponde a los peatones (OMS, 2015). Por otra parte, la probabilidad que un peatón pierda la vida en la carretera varía en función de la región. Esto se observa sobre todo en los países de ingresos bajos, cuya tasa de muerte de peatones es la más alta, con aproximadamente un 35% del total de muertes (Yao, Loo, & Lam, 2015). En el caso de los países de las Américas, del total de muertes ocasionadas por el tránsito, un 45% corresponde a los peatones y ciclistas (OPS, 2016). Colombia no es ajena a la situación que vive la región a la que pertenece (las Américas), durante el año 2015 los accidentes peatonales fueron el segundo tipo de accidente con 11,417 casos, equivalente a un 21.6% del total de accidentes (INMLCF, 2015). Además, durante el año 2016, las muertes y lesiones que se presentaron en el país a causa de accidentes de tránsito se concentran en los usuarios vulnerables, dejando como víctimas a los peatones en un 25.5% del total de accidentes (INMLC, 2016). En Colombia, una de las ciudades con mayor número de accidentes peatonales es Santiago de Cali, ya que presentó un promedio de 108 accidentes peatonales por mes en el año 2016 y un total de 1,301 casos en el año, de los cuales 1,186 corresponden a peatones lesionados y 115 a peatones muertos (OMSSV, 2016). Así mismo, para el año 2017, la ciudad presentó un promedio de 100 accidentes peatonales por mes para un total de 1,205 casos, dejando 1,077 peatones lesionados y 128 peatones muertos (OMSSV, 2017). Las posibles causas que se asocian a esta realidad son el aumento de la motorización, el comportamiento de los usuarios de la vía y las características de la infraestructura vial de la ciudad (El Pais, 2015).

Con respecto a las características de la infraestructura vial urbana en Cali, se evidencia que está conformada por 2,684.14 kilómetros por eje de vía, de los cuales el 12.46% corresponde a vías arterias primarias, el 8.49% a vías arterias secundarias, el 7.64% a vías colectoras, el 68.04% a vías locales y el 3.36% a vías interregionales que hacen parte del perímetro urbano del municipio (DAPM, 2017). Además, se observa que el 59% de la red vial en Santiago de Cali se encuentra en condiciones regulares y el 11% de las vías están en mal estado, únicamente el 30% de las vías presentan un buen estado (DAPM, 2017). Así mismo, un estudio elaborado por el observatorio de movilidad sostenible en Santiago de Cali determinó que las zonas críticas de accidentes de tránsito se componen principalmente de vías en estado regular (OMSSV, 2016). Por lo que resulta necesario explorar si existe algún tipo de relación entre los accidentes peatonales y la infraestructura vial en la ciudad, lo cual hace que surja la pregunta: ¿Cómo se relacionan los accidentes peatonales y la infraestructura vial en Santiago de Cali?

2. OBJETIVOS

Objetivo General

Identificar la relación entre los accidentes peatonales y la infraestructura vial en la ciudad de Santiago de Cali.

Objetivos Específicos

- Caracterizar los accidentes peatonales en la ciudad de Santiago de Cali entre los años 2008 y 2013.
- Identificar las características geométricas (estructura o patrones de la red vial) y operacionales de la infraestructura vial que componen la ciudad.
- Relacionar de forma espacial los accidentes peatonales con las características geométricas y operacionales de la infraestructura vial.

3. JUSTIFICACIÓN

Los beneficios que el presente estudio ofrece van direccionados hacia las entidades o autoridades encargadas de la movilidad y seguridad vial de la ciudad: la secretaria de infraestructura, la agencia nacional de seguridad vial, secretaria de movilidad, observatorios de movilidad y los tomadores de decisiones, para que a partir de investigaciones como esta se pueda evaluar y considerar la seguridad vial desde un enfoque integrado en el contexto de la infraestructura, programas de socialización, usos del suelo y planificación del transporte.

El presente estudio aporta valor por medio de tres productos: la distribución espacial de los accidentes peatonales en Santiago de Cali, la identificación de patrones de infraestructura vial a nivel de barrio de la ciudad y el modelo de relación entre los accidentes peatonales y los patrones de infraestructura vial. En primer lugar, la distribución de accidentes peatonales en la ciudad permite a los planificadores identificar o diseñar soluciones peatonales en los barrios que presentan mayor frecuencia de accidentes. En segundo lugar, identificar patrones de infraestructura vial a nivel de barrio permite realizar asociaciones entre peatones o entre cualquier usuario de la vía, por lo que se potencia la generación de información espacial en la ciudad. En tercer lugar, a partir del modelo planteado en este estudio se podrá identificar los patrones de infraestructura vial que mayor inseguridad causa a los peatones en la ciudad. Por lo tanto, las intervenciones en este tipo de redes viales serán más precisas y contarán con una metodología diferente a las tradicionales.

4. MARCO CONTEXTUAL

4.1 MARCO CONCEPTUAL

A continuación, se introducen y definen los conceptos principales a tratar en el presente estudio:

Accidente: evento generado al menos por un vehículo en movimiento, que causa daños a personas y bienes involucrados en el mismo; igualmente afecta la circulación de los actores que se movilizan por la zona de influencia del evento.

Autocorrelación espacial: se basa en la afirmación de que en el espacio geográfico todo se encuentra relacionado con todo, pero las unidades más cercanas tienen mayor relación que con las lejanas. Por lo tanto, la autocorrelación espacial sirve para analizar cómo influye la componente espacial en el comportamiento de una variable analizada.

Carril: parte de la calzada destinada al tránsito de una sola fila de vehículos.

Conectividad: número de segmentos viales (arcos) que se intersectan directamente con un segmento vial estudiado.

Clúster: grupo de entidades que poseen atributos o valores semejantes.

Geo-codificación: proceso por medio del cual se logran transformar las direcciones de una zona urbana, asociadas a un registro o base de datos, en coordenadas de un sistema de referencia que logre obtener la ubicación del registro en forma puntual.

Geo-proceso: proceso fundamental en los análisis con datos geográficos.

Heterogeneidad Espacial: variación de un fenómeno respecto a la relación con el espacio.

Infraestructura vial conjunto de elementos (patrones de red vial, intersecciones semaforizadas, puntos de parada, usos del suelo etc.) que se conectan entre sí con el fin de permitir la movilidad de los actores viales a lo largo de un territorio.

Matriz de Haddon: matriz que relaciona los tres factores (columnas) principales de un accidente entre los que se encuentran el comportamiento humano, el estado de los vehículos y la infraestructura vial. Además, representa las fases (filas) antes, durante y después de un accidente. Esta matriz se fundamenta en el concepto de triada epidemiológica, el cual concibe los accidentes como una enfermedad que alcanza el grado de epidemia.

Medios de transporte: conjunto de vehículos que permiten el traslado de personas o bienes. En el transporte de personas se consideran los medios motorizados (vehículo privado, autobús, tranvía etc.) y no motorizados (caminar y la bicicleta).

Movilidad sostenible: movilidad eficiente, segura, equitativa, saludable, participativa y competitiva.

Multicolinealidad: situación en la que se presenta una fuerte correlación entre variables explicativas de un modelo dado.

Peatón: individuo o persona que transita a pie o por espacios públicos. Se debe tener en cuenta que el peatón tiene la prioridad en la movilidad.

Seguridad vial: se define como el conjunto de acciones y políticas dirigidas a prevenir, controlar y disminuir el riesgo de muerte o de lesión de las personas en sus desplazamientos ya sea en medios motorizados o no motorizados.

Sintaxis Espacial: estudia las relaciones o interacciones entre el espacio y la sociedad tomando como fundamento que uno modifica al otro. Por lo tanto, convierte el espacio continuo (redes de infraestructura vial, edificios etc.) en unidades discretas (arcos y nodos) que se conectan entre sí, generando espacios denominados: configurados (mapas convexos o mapas axiales).

4.2 MARCO REFERENCIAL

Para el desarrollo de una movilidad sostenible, el transporte no motorizado es esencial (Miranda-Moreno, 2011). Por esta razón, las ciudades donde existen mayor cantidad de desplazamientos a pie o en bicicleta consumen cuatro veces menos energía (Lizarraga, 2006). De esta forma, los medios de transporte no motorizados generan menos contaminación y menor congestión para las ciudades (Florez & Patiño, 2014). Sin embargo, los actores del transporte no motorizado son uno de los más vulnerables en los accidentes de tránsito, como es el caso de los peatones (Chen, Lin, & Loo, 2011; Chandra et.al, 2014). Por lo tanto, los peatones son uno de los focos en las investigaciones de seguridad vial (Zhang et.al, 2012).

Los peatones constituyen el 22% del total de las muertes en accidentes de tránsito en el mundo y para las américas corresponde a un 23% (OMS, 2015). Estudios a nivel mundial intentan explicar las causas de estos grandes porcentajes de accidentalidad en peatones. Por esta razón, Miranda-Moreno et.al (2011) afirman que, a mayor tráfico de peatones, mayor actividad de los mismos y sumado al volumen del tráfico vehicular en una zona, se generan más accidentes. Por otro lado, el riesgo de muerte de un peatón debido a un accidente con un vehículo de motor esta entre 5% a 45% (cuando la velocidad del vehículo es de 30 a 40 kilómetros por hora) mientras que el riesgo de muerte se incrementa a un 85% cuando la velocidad llega o superar los 60 kilómetros por hora (Moudon et.al, 2011).

Todo esto deja ver que más del 50% de los accidentes de peatones son causados por vehículos que conducen a más de 60 kilómetros por hora y que también pueden ser ocasionados por errores de los peatones como la falta de atención, ignorar controles de tráfico peatonal, falta de conciencia y precaución (Abojaradeh, 2013). De esta forma, se observa que el comportamiento humano también influye en los accidentes de tránsito. Esto se define como el factor humano y es aproximadamente el 90% de los causales de siniestralidad, por lo que el comportamiento humano debe acompañar al factor vehicular e ir de la mano de la infraestructura vial para reducir accidentes de tránsito (Alvarez & Lopez, 2014). Autores como Flórez y Patiño (2014) encuentran que existe una relación entre los niveles de accidentalidad y la infraestructura vial, concluyendo que al tener una infraestructura vial con deficiencias aumentan las probabilidades de muertes por accidente de tránsito en usuarios no motorizados.

Estudios previos plantean metodologías para conocer cómo es la relación entre el número de accidentes peatonales y la infraestructura vial. Estos estudios se han desarrollado a un nivel macro, ya que utilizan la correlación espacial con los datos de accidentes peatonales agregados a entidades geográficas (Siddiquia, Abdel-Atya, & Choi, 2012). Además de la correlación espacial, se puede tener un mejor entendimiento de la ocurrencia de accidentes peatonales a partir de las relaciones entre la frecuencia de accidentes y una serie de variables independientes (Lam, Yao, & Loo, 2014). De forma común, algunas de las variables independientes utilizadas en las investigaciones de accidentes peatonales son: el volumen de tráfico, empleo y población, nivel de pobreza, edad, usos del suelo; las características del vehículo, el comportamiento de los usuarios de la vía, condiciones ambientales y las características de la infraestructura (Zhang, Bigham, Li, & Ragland, 2012). La infraestructura vial juega un rol importante en la seguridad vial, ya que el aumento de los flujos de tráfico a través de las redes viales puede afectar la seguridad de los usuarios no-motorizados (Zhang, Bigham, Ragland, & Chen, 2015). Además, las características de las redes viales (físicas y operacionales) han sido tratadas previamente, ya que la función de las redes es conectar lugares separados espacialmente y satisfacer la movilidad desde orígenes a destinos (Aguero-Valverde & Jovanis, 2008; Dumbaugh & Zhang, 2013; Lam, Yao, & Loo, 2014). Algunos autores como Guo et.al 2017 presentan una metodología que permite estudiar las estructuras de las redes viales a partir del índice de integración global, el cual se basa en teorías de sintaxis espacial (Hillier & Hanson, 1984).

En relación con los métodos para el estudio del fenómeno de los accidentes peatonales, algunos investigadores como Agüero-Valverde y Jovanis (2008) utilizaron el método de Bayes, ya que es conocido por su flexibilidad y su amplio uso en los análisis donde la correlación espacial juega un papel importante. Por otra parte, autores como Vieira (2013) utiliza modelos bayesianos con correlación espacial entre entidades geográficas. También el uso de otro tipo de modelos estadísticos como el Modelo Binomial Negativo son ampliamente usados en la literatura al igual que el modelo GWR (Regresión Geográficamente Ponderada – por sus siglas en inglés) (Yao, Loo, & Lam, 2015). El modelo GWR tiene en cuenta la variación o heterogeneidad espacial entre accidentes peatonales y factores de la infraestructura vial, generando resultados más precisos (Zhang, Bigham, Li, & Ragland, 2012). Esto quiere decir que el GWR reconoce la existencia de variaciones espaciales en los accidentes peatonales, a partir de la calibración del modelo de regresión. Los resultados de estudios recientes indican que los modelos que consideran la heterogeneidad y la correlación espacial obtienen resultados más precisos, como es el caso del GWR (Lam, Yao, & Loo, 2014).

4.3 MARCO TEÓRICO

A continuación, se muestra en detalle cada uno de los modelos y ecuaciones utilizados en el presente estudio:

4.3.1 Análisis Espacial: identificar las zonas de mayor frecuencia de accidentes peatonales en Santiago de Cali es fundamental para entender el comportamiento de dicho fenómeno. En el presente estudio se implementa el método de densidad de Kernel con el fin de reconocer a nivel global (toda la ciudad) las zonas con mayor ocurrencia de accidentes peatonales. Posteriormente, se agregan los registros de accidentes peatonales a nivel de barrio para el cálculo del índice de Moran, el cual muestra

si el fenómeno de los accidentes peatonales cumple con una configuración espacial a nivel global (agrupada, dispersa o aleatoria). Además, se utiliza el método LISA para conocer cuánto contribuye cada unidad geográfica (barrio) en la configuración espacial de los accidentes peatonales en la ciudad.

4.3.1.1 Densidad de Kernel (λ): método que se encarga de calcular la cantidad de entidades geográficas por unidad de área mediante un radio de búsqueda asignado (bandwidth). Este método genera una superficie continua por medio de entidades geográficas discretas (puntos o líneas), las cuales representan algún fenómeno (accidentes peatonales, robos etc.). Según Gatrell et.al (1996) la función de densidad se basa en la siguiente ecuación:

$$\lambda(s) = \sum_{d_i \leq \tau} \frac{3}{\pi\tau^2} \left(1 - \frac{d_i^2}{\tau^2}\right)^2 \quad (1)$$

Donde $\lambda(s)$ se define como la intensidad, d_i es la distancia entre un evento puntual s localizado en el área de estudio y la ubicación de cada uno de los puntos $s_{i\tau}$ del fenómeno estudiado, la sumatoria se realiza entre los valores $d_i \leq \tau$, τ es el radio de búsqueda. Esta función de densidad utiliza un kernel cuadrático propuesto por (Silverman, 1986), el cual toma un valor de $3/\pi\tau^2$ cuando se encuentra en el evento puntual s y disminuye progresivamente hasta llegar a 0 cuando se alcanza la distancia τ . Por lo tanto, resulta importante definir un radio de búsqueda adecuado.

El radio de búsqueda (τ) se encarga de la suavidad o rugosidad de la superficie generada por la función de densidad, es decir que un radio de búsqueda alto genera una superficie con un grado alto de suavidad (análisis global). Por otra parte, si el radio de búsqueda es bajo, se genera una superficie con un grado alto de rugosidad (análisis local). En consecuencia, Silverman (1986) plantea un algoritmo de radio de búsqueda (bandwidth) que permite obtener un valor por defecto para cualquier grupo de entidades geográficas de entrada (puntos o líneas), este algoritmo se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\tau = 0.9 * \min \left(SD, \sqrt{\frac{1}{\ln(2)}} * D_m \right) * n^{-0.2} \quad (2)$$

Donde SD es la distancia estándar entre el punto central de las entidades de entrada y todos los demás puntos estudiados, D_m es la distancia media y n es el número total de puntos.

4.3.1.2 Natural Breaks (Jenks): método de clasificación natural que tiene en cuenta las características inherentes de los datos estudiados con el fin de encontrar cortes naturales en los mismos, los cuales sirven como límites de los intervalos de clase (figura 1). Este método ordena todos los datos en forma creciente y encuentra los cortes naturales, además, por medio del algoritmo *Jenks* selecciona los mejores cortes comparando la homogeneidad interna de los datos versus la heterogeneidad entre agrupamientos (Buzai & Baxendale, 2006).

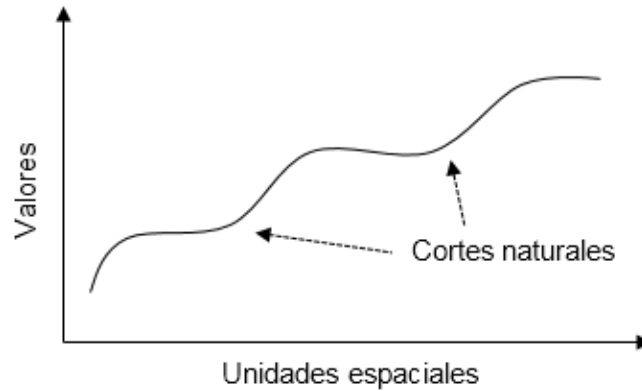


Figura 1. Método de clasificación natural breaks (Jenks)
Fuente: Buzai & Baxendale (2006).

4.3.1.3 Índice de Moran (I): el índice de moran es uno de los principales cálculos que se utiliza para medir la autocorrelación espacial, su función es comparar los valores de cada unidad geográfica con los valores de las unidades vecinas (Buzai & Baxendale, 2006). La ecuación que representa el índice de moran se muestra a continuación:

$$I = \frac{n \sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_i \sum_j w_{ij}) \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

Donde n es el número de unidades espaciales, x_i es el valor de la variable en la unidad geográfica central, x_j es el valor en otra unidad geográfica, \bar{x} es la media de la variable y w_{ij} corresponde a la matriz de contigüidad, la cual identifica si una unidad geográfica i es contigua con otra unidad j asignándole el valor de 1, de lo contrario se asigna un valor de 0.

El índice de moran obtiene resultados que varían entre -1 (máxima autocorrelación espacial negativa) y 1 (máxima autocorrelación espacial positiva). Por otra parte, cuando el resultado es cero, se interpreta que la distribución espacial sigue un patrón aleatorio. Por lo tanto, se debe evaluar la significatividad de la autocorrelación.

Un test de hipótesis se debe llevar a cabo para evaluar la significatividad de una autocorrelación espacial. Este tipo de test plantea una hipótesis nula (H_0) y una hipótesis alternativa (H_1), la primera plantea que la configuración espacial se produce de manera aleatoria y la segunda establece la afirmación contraria. Por lo tanto, se debe especificar un nivel de significancia (0.05 - 5%) que permita aceptar la hipótesis alternativa y rechazar la hipótesis nula (Buzai & Baxendale, 2006). En consecuencia, cuando el p-value (valor que reporta el test de hipótesis) obtiene un valor menor al nivel de significancia, se rechaza la hipótesis nula y se acepta que la configuración espacial no se produce de forma aleatoria.

4.3.1.4 Indicador Local de Asociación Espacial (LISA, Local Indicator of Spatial Association, I_i): el método LISA permite descomponer el índice de Moran y evaluar cuánto contribuye cada unidad geográfica a la formación del valor global de autocorrelación, es decir que identifica los patrones locales de asociación espacial (Buzai & Baxendale, 2006). Es decir que reconoce las agrupaciones entre unidades geográficas que posean valores similares (clúster) y su nivel de significancia. A continuación, se presenta la ecuación que implementa el método LISA:

$$I_i = (x_i - \bar{x}) \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (4)$$

Donde x_i es el valor de la variable en la unidad geográfica central, x_j es el valor en otra unidad geográfica, \bar{x} es la media de la variable y w_{ij} corresponde a la matriz de contigüidad.

4.3.2 Análisis con Sintaxis Espacial: en cuanto a la infraestructura vial, la sintaxis espacial integrada con los sistemas de información geográfico (SIG) provee herramientas útiles para describir las redes viales (Bafna, 2003). La sintaxis espacial convierte el espacio continuo (redes de infraestructura vial) en unidades discretas (arcos y nodos) que se conectan entre sí generando espacios denominados configurados (mapas axiales). Estos espacios configurados permiten la caracterización de las redes de infraestructura vial por medio de algunas medidas topológicas: *profundidad media*, *índice de integración global* (Gatrell, Trevor Bailey, & Rowlingson, 1996) e *índice de centralidad entre redes*.

4.3.2.1 Profundidad Media (MD_i): es una medida topológica que define la distancia entre un arco de origen y un arco de destino sobre el mapa axial de una red vial (Guo et.al, 2017). Esta distancia se mide en niveles de vecindad, es decir que un arco de origen tiene en su nivel 1 de vecindad a sus vecinos más cercanos (arcos que conectan directamente con el arco de origen), así mismo, en el nivel 2 se encuentran los arcos que se conectan directamente con los vecinos más cercanos del arco de origen y así sucesivamente hasta completar todos los niveles de vecindad que posea la red (figura 2). Por tanto, la profundidad media es la distancia promedio desde cada arco de la red hasta los demás.

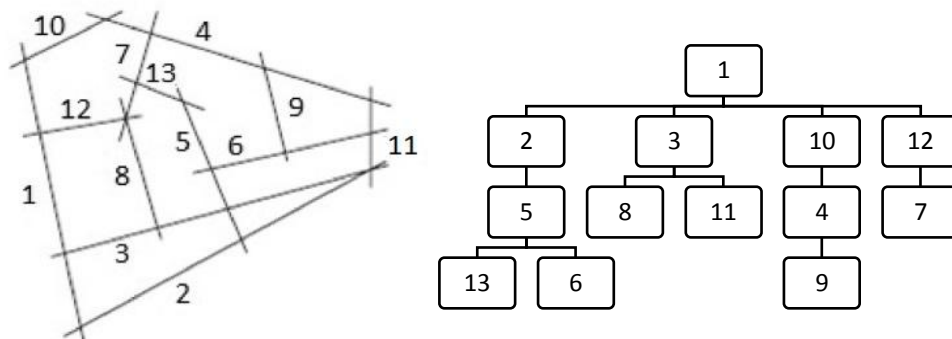


Figura 2. Medida de profundidad media para el mapa axial de una red vial: (a) mapa axial (b) niveles de vecindad del arco 1.

Fuente: Guo et.al (2017).

La expresión utilizada en el presente estudio para calcular la profundidad media de una red vial se representa por medio de la siguiente ecuación:

$$MD_i = D_i / (n - 1) = \sum_{d=1}^s \frac{d \times N_d}{(n - 1)} = \begin{cases} \text{local mean depth} & s = k \\ \text{global mean depth} & s = l \end{cases} \quad (5)$$

Donde MD_i : profundidad media, D_i : profundidad del arco i , n : número de arcos dentro de la red estudiada, d : nivel de vecindad, N_d : número de arcos con los que se conecta, s : número de niveles de vecindad considerados en la red, k : número de niveles de vecindad considerados por el investigador y l : todos los niveles de vecindad.

4.3.2.2 Índice de Integración Global (GI_i): representa la accesibilidad de una red vial derivada de la profundidad media (Hillier & Hanson, 1984). Por tanto, la integración mide que tan accesible es un nodo con respecto a otros nodos de la red vial a la que pertenecen. Así mismo, el índice de integración global cambia sistemáticamente con diferentes patrones de red vial (figura 3) y es una medida topológica apropiada para describir cualquier tipo de patrón de red (Guo et.al, 2017). A continuación, se muestra la ecuación a implementar en el cálculo del índice de integración global:

$$GI_i = \frac{D_n}{2 (MD_i - 1) / (n - 2)} \quad (6)$$

Donde $D_n = 2 \{n[\log_2((n + 2)/3) - 1] + 1\} / (n^2 - 3n + 2)$, MD_i : profundidad media y n : número de nodos en el sistema.

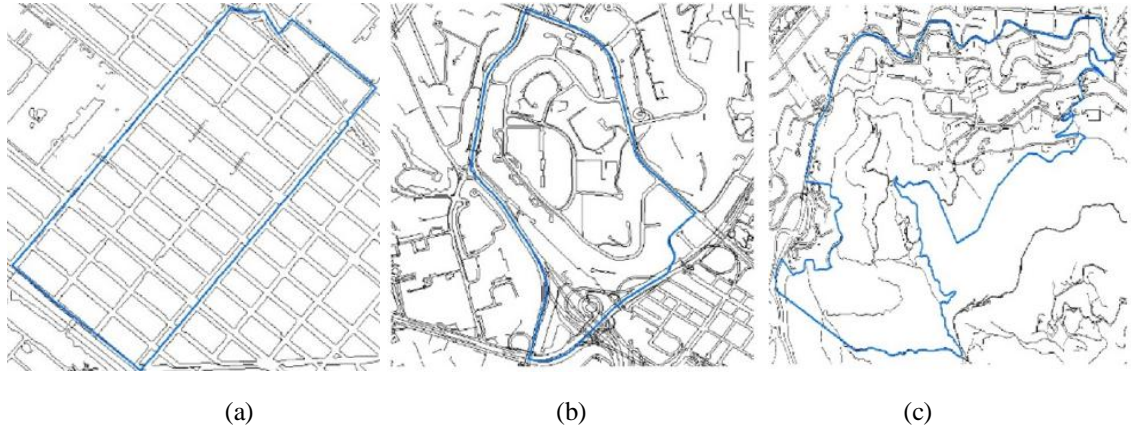


Figura 3. Clasificación de patrones de red vial (GI_i): (a) Grilla, (b) Grilla deforme e (c) Irregular
Fuente: Guo et.al (2017).

En consecuencia, una red vial con un alto índice de integración global se puede clasificar como un patrón de grilla, ya que este patrón se refiere a redes con alta accesibilidad, un número alto de

intersecciones y la densidad vial tiende a ser mayor, lo que permite una forma regular. En contraste, una red vial con bajo valor de integración global se clasifica como irregular. Por tanto, en la tabla 1 se muestran los niveles de clasificación que se utilizarán por cada tipo de patrón vial según el valor del índice de integración global para la ciudad de Santiago de Cali.

Tabla 1. Nivel de clasificación por cada tipo de patrón vial según el Índice de Integración Global

Nivel	Índice de Integración Global (GI_i)		Clasificación
	Rango	Patrón red vial	
Alto	0.73 - 1.19	Grilla	Natural breaks
Medio	0.43 - 0.73	Grilla deforme	
Bajo	0.04 - 0.43	Irregular	

Fuente: Elaboración propia con datos de las vías de Santiago de Cali obtenidas de la IDESC

4.3.2.3 Índice de Centralidad entre Redes (C^B): La centralidad entre redes es una medida topológica planteada por (Freeman, 1979), la cual puede cuantificar que tan importante o central es un segmento (arco) respecto a una red vial. A su vez, la centralidad se basa en la frecuencia con que se intersecta un segmento (arco) dentro de una red vial (Zhang et.al, 2015). Por tanto, se debe calcular el parámetro de centralidad de punto (nodo), el cual determina la probabilidad de que un nodo se intersecte con un segmento (arco) de la red. Este parámetro se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$C_i^B = \sum_j^n \sum_k^n [g_{jk(i)} / g_{jk}] \quad i \neq j \neq k \quad (7)$$

Donde C_i^B : centralidad del punto i , $g_{jk(i)}$: número de arcos entre los puntos j y k que contienen el punto i , g_{jk} : número de arcos entre los puntos j y k . Posteriormente, se procede a calcular el índice de centralidad entres redes por medio de la siguiente ecuación:

$$C^B = \sum_{i=1}^n (C_i^B - C_i^B) / \max \sum_{i=1}^n (C_i^B - C_i^B) \quad (8)$$

Donde C^B : centralidad de la red, C_i^B : centralidad del punto i , C_i^B : mayor valor de centralidad de punto (nodo). Por tanto, un valor alto en el índice de centralidad se refiere a una red vial con gran número de segmentos que solo sirven de conexión para otros segmentos, es decir que algunas vías son más centrales e importantes que otras (Zhang et.al, 2015). Así que un índice de centralidad alto se refiere a un patrón de red vial irregular (figura 4), en contraste con un índice de centralidad bajo que se refiere a un patrón de grilla.

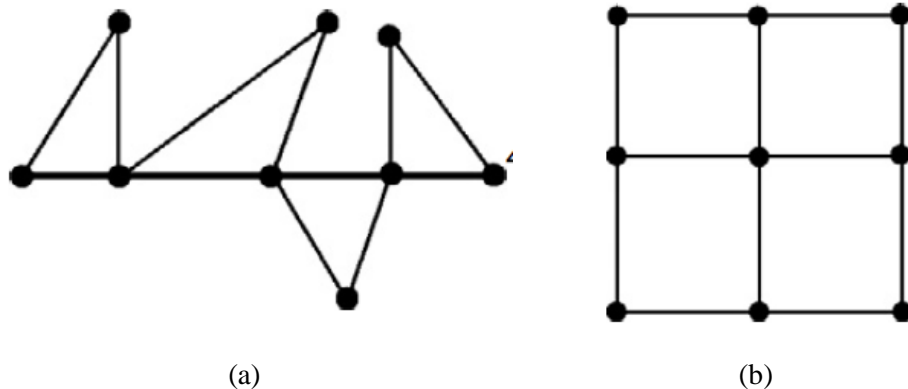


Figura 4. Clasificación patrones de red vial (CE): (a) Grilla e (b) Irregular
Fuente: Zhang et.al (2015).

En la figura 4a se muestra una red con alto valor de centralidad entre redes, ya que la red depende del segmento (arco) principal para poder conectarse con los demás. Igualmente, la figura 4b muestra una red con bajo valor de centralidad entre redes, ya que la red no depende de un solo segmento. Por tanto, en la tabla 2 se muestran los niveles de clasificación que se utilizarán por cada tipo de patrón vial según el valor del índice de centralidad entre redes para la ciudad de Santiago de Cali.

Tabla 2. Nivel de clasificación por cada tipo de patrón vial según el Índice de Centralidad entre redes

Nivel	Índice de Centralidad entre Redes (C^B)		Clasificación
	Rango	Patrón red vial	
Alto	0.20 - 0.67	Irregular	Natural breaks
Medio	0.10 - 0.20	Grilla deforme	
Bajo	0.05 - 0.10	Grilla	

Fuente: Elaboración propia con datos de las vías de Santiago de Cali obtenidas de la IDESC.

4.3.2.4 Modelo de Velocidad: desarrollado por (Reina & Rojas, 2016), el cual se basa en la relación entre los datos de velocidades de campo obtenidas de la IDESC (Infraestructura de Datos Espaciales de Santiago de Cali) y los datos de velocidad provenientes de la plataforma de Google Maps. Este modelo calcula las velocidades de las vías colectoras y locales de la ciudad, el cual se representa con la siguiente ecuación:

$$y = 0.0077x^2 + 0.5271x + 6.1399 \quad (9)$$

Donde y : es la velocidad del segmento vial estudiado (km/h) y x : velocidad tomada en Google Maps (km/h).

4.3.3 Modelo de Regresión Geográficamente Ponderado: Por último, la relación entre los accidentes peatonales (variable dependiente) y la infraestructura vial (variables independientes) se analiza mediante el *modelo GWPR*. Sin embargo, previo al cálculo de este modelo se debe evaluar la normalidad de las variables mediante la prueba *Shapiro–Wilk*, posteriormente realizar una *matriz de correlación de Spearman* e implementar un *modelo GLM*, el cual expone la significancia estadística de la relación entre las variables a nivel global.

4.3.3.1 Prueba Shapiro-Wilk (W): sirve para evaluar la normalidad de un conjunto de datos a partir de una hipótesis nula que plantea que los datos se distribuyen normalmente (Shapiro, 1965). En consecuencia, si el valor de p es menor al umbral de significancia (0.05), entonces se rechaza la hipótesis nula y se afirma que los datos no cuentan con una distribución normal. Por el contrario, si el valor de p supera el umbral de significancia, se confirma la hipótesis nula y se reconoce que los datos tienen una distribución normal. Los valores de esta prueba pueden variar entre 0 y 1. A continuación se muestra la ecuación que representa la prueba:

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (10)$$

Donde $x_{(i)}$: número que ocupa la posición i en la muestra con orden creciente, \bar{x} : es la media muestral, $a_i: \frac{m^T V^{-1}}{m^T V^{-1} V^{-1} m^{1/2}}$ donde m : es el valor medio del estadístico y V : la matriz de covarianza.

4.3.3.2 Correlación de Spearman (r_s): El coeficiente de correlación de Spearman es una medida de asociación entre variables ordenadas y discretas, así mismo, sus valores son -1 para asociaciones negativas, +1 para asociaciones positivas y el 0 indica que no hay correlación entre las variables (Anderson et.al, 2008). El coeficiente de correlación de spearman se representa con la siguiente ecuación:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (11)$$

Donde n : número de parejas de datos; d : diferencia entre x_i y y_i .

4.3.3.3 Golden Section Search: proceso que compara el modelo especificado con diferentes valores de bandwidth y selecciona el que cuente con menor valor del Criterio de información de Akaike (AICc), con el fin de identificar un bandwidth óptimo para el modelo GWPR. Este proceso es implementado en el software *GWR4*© y en la mayoría de los casos se identifica eficientemente el bandwidth óptimo (Nakaya, 2016).

4.3.3.4 Modelo Lineal Generalizado (GLM): es una extensión de los modelos lineales que se aplican cuando existen variables dependientes de tipo conteo, binario o proporción. Además, estos modelos son útiles en los datos con varianza no constante y con una distribución no normal. Por consiguiente, es un modelo que ha sido ampliamente usado en estudios de seguridad vial, los cuales cuentan con datos de accidentes de tránsito que siguen distribuciones de tipo binomial negativo o Poisson (Li et.al, 2013). El modelo con la función de Poisson utilizado para los datos de conteo se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\ln(Y) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_j X_j \quad (12)$$

Donde $\ln(Y)$: logaritmo natural de la variable dependiente, X_j : variables independientes, β_0 : coeficiente del intercepto, β_j : coeficientes de las variables independientes. Los modelos lineales generalizados estiman modelos cuyos coeficientes son globales, es decir que los coeficientes no varían, estos son fijos.

4.3.3.5 Modelo de Regresión Geográficamente Ponderada de Poisson (GWPR): El concepto de un modelo de regresión ponderada geográficamente se basa en que las entidades más cercanas al punto observado tienen mayor influencia que las que se encuentran más lejos (Li et.al, 2013). Este modelo trata de capturar la variación espacial de un fenómeno, a partir de una función de peso denominada kernel espacial (Timbó et.al, 2017). Existen dos tipos de kernel: Gaussiano y bi-cuadrático. El primero se basa en un valor fijo para todo el grupo de datos y el segundo se adapta de acuerdo a la distribución de los mismos. Sin embargo, el principal factor a considerar es el bandwidth que utilizará el modelo, ya que si es alto se obtendrán resultados agregados y si es bajo los resultados serán desagregados. Por tanto, se utiliza el método Golden section search que se encarga de calcular un bandwidth óptimo para el modelo a partir del criterio AICc (Nakaya, 2016). En el modelo GWPR se estiman los datos de conteo (accidentes peatonales) a partir de una serie de factores explicativos que se permiten variar en el espacio y la distribución de Poisson, dicho modelo se representa mediante la siguiente ecuación:

$$y_i \sim \text{Poisson} \left[t_j \exp \left(\sum_k \beta_k(u_j, v_j) x_{jk} \right) \right] \quad (13)$$

Donde (u_j, v_j) : coordenadas del punto j , t_j : es la variable offset, β_k : coeficiente relacionado con la variable explicativa, x_{jk} : variables explicativas, k : número de variables y y_i : variable dependiente.

4.3.3.6 Criterio de Información de Akaike (AICc): el criterio de información de Akaike es una función que se basa en AIC (Akaike information criterion) pero se aplica a muestras grandes de datos y no genera sobre-ajustes. Esta función es útil para evaluar el ajuste y la complejidad de los modelos

(Timbó et.al, 2017). Así mismo, se utiliza para comparar modelos y presenta mejores resultados en las regresiones de Poisson (Nakaya, 2016). La función se representa mediante la siguiente ecuación:

$$AICc = -2L(\beta, \alpha) + 2k + \frac{2k(k+1)}{n-k-1} \quad (14)$$

Donde k : número efectivo de parámetros, $L(\beta, \alpha)$: logaritmo de la máxima probabilidad del modelo evaluado.

4.3.3.7 Prueba de variabilidad geográfica: evalúa si los factores explicativos de un modelo GWPR cuentan con variación espacial. Esto se realiza mediante la comparación del modelo original (modelo calculado) y un modelo fijo (modelo calculado con valores fijos para el factor explicativo evaluado) por medio del criterio AICc (Nakaya, 2016). La prueba se representa mediante la siguiente relación:

$$Diff = AICc(MO) - AICc(MF) \begin{cases} \text{Variación} & Diff < -2 \\ \text{Sin variación} & -2 < Diff < 2 \end{cases} \quad (15)$$

Donde Diff: diferencia de criterio, AICc: criterio de información de Akaike, MO: modelo original, MF: modelo fijo.

5. METODOLOGÍA

5.1 ZONA DE ESTUDIO

La ciudad de Santiago de Cali es la capital del Valle del Cauca, se encuentra ubicada al suroccidente de Colombia con coordenadas geográficas 3°27'26" Norte y 76°31'42" Oeste (figura 5). La ciudad tiene una superficie de 119.2 km² y está ubicada a una altitud aproximada de 1070 m.s.n.m. Cuenta con aproximadamente 2'400.000 habitantes en su zona urbana (DAP, 2016).

En la última década, Santiago de Cali se ha ubicado entre las ciudades de Colombia con mayores índices de accidentalidad (INMLC, 2016). Dichos índices muestran que uno de los actores más vulnerables son los peatones. En consecuencia, los años 2015 y 2016 muestran que el porcentaje de muertes por accidentes peatonales corresponde al 38% y 35%, respectivamente (OMSSV, 2016).

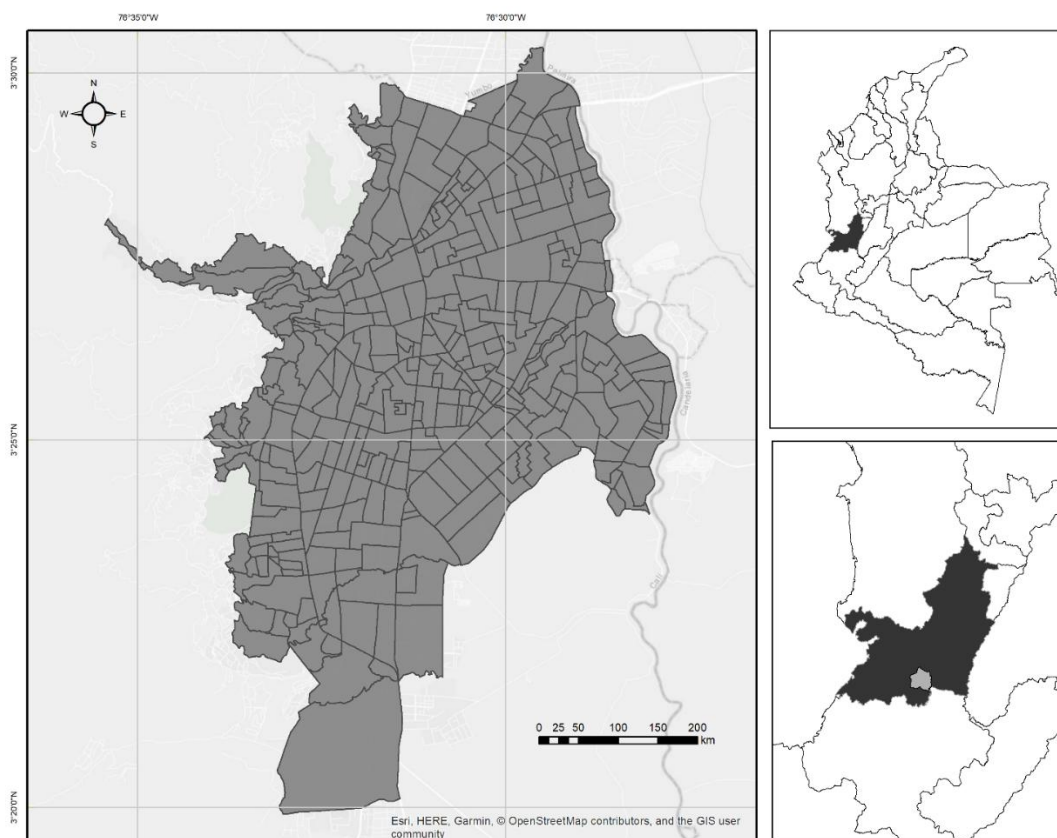


Figura 5. Zona de Estudio: Santiago de Cali.

Según el diagnóstico elaborado en el Plan Integral de Movilidad Urbana (PIMU 2015), la red vial urbana en Cali está conformada por 2,684.14 kilómetros por eje de vía, de los cuales el 12.46% corresponde a vías arterias primarias, el 8.49% a vías arterias secundarias, el 7.64% a vías colectoras, el 68.04% a vías locales y el 3.36% a vías interregionales que hacen parte del perímetro urbano del municipio (DAPM, 2017). Por otra parte, el inventario realizado en el PIMU expone el estado de la superficie de la red vial en la ciudad, concluyendo que el 59% de la red se encuentra en estado regular,

solo el 27% de las vías presenta un buen estado, el 11% de las vías están en mal estado y el 3% de las vías de la red se encuentran sin pavimentar, todos estos porcentajes se hicieron sobre la base de 974 kilómetros que corresponden a la red principal del subsistema vial de la ciudad (DAPM, 2017). Al analizar el estado de las vías versus los eventos de tránsito, se determinó que las zonas críticas se presentan en mayor proporción sobre las vías en estado regular (OMSSV, 2016).

Una de las características en estudios de seguridad vial es reconocer a los peatones como actores vulnerables, dado que pueden ser afectados por una gran cantidad de factores entre los que se encuentran las estructuras o patrones de la infraestructura vial. Estos patrones tienen una característica zonal o de área (Zhang, Bigham, Ragland, & Chen, 2015). Por lo tanto, algunas investigaciones plantean el uso de bloques censales o grupo de bloques con condiciones demográficas y económicas aproximadamente homogéneas que varían en área (Dumbaugh & Zhang, 2013; Siddiquia, Abdel-Atya, & Choi, 2012). En consecuencia, el presente proyecto utilizará como unidad de análisis los barrios. Estos son equivalentes a las unidades de bloques censales o grupos de bloques que ofrecen la posibilidad de estudiar el fenómeno de los accidentes peatonales y patrones de infraestructura vial por medio de áreas. Además, el número de barrios en la ciudad (334 barrios) representa un valor estadísticamente significativo para el modelo de regresión geográfico (GWR), el cual se implementa en el presente proyecto.

5.2 DATOS DE ENTRADA

Los datos de entrada del presente estudio están constituidos fundamentalmente por recursos (tabla 3) provenientes de entidades en Santiago de Cali como: Infraestructura de Datos Espaciales de Santiago de Cali (IDESC) y el Grupo de Investigación en Transporte, Tránsito y Vías (GITTV) de la Universidad del Valle. Todos los recursos son depurados con el fin de garantizar que se encuentran en el periodo de estudio seleccionado para el presente estudio:

Tabla 3. Recursos de entrada

Recurso	Atributos	Periodo	Fuente	Formato
Barrios	nombre	2014	IDESC - POT	.shp
	estrato			
	área			
Registros de accidentes de tránsito en Santiago de Cali	id accidente	2004 - 2013	Suministrado por parte del Fondo de Prevención Vial al GITTV de la Universidad del Valle	.xls
	año			
	día			
	hora evento			
	edad			
	sexo			
	escolaridad			
	tipo de vehículo			
	severidad			
	barrio			
	dirección			
Red Vial	nombre	2014	IDESC – POT	.shp
	tipo de vía			

Recurso	Atributos	Periodo	Fuente	Formato
Intersecciones Semaforizadas	dirección	2014	IDESC – Movilidad	.shp
Puntos de Parada MIO	nombre	2014	IDESC - POT	.shp
	tipo			
	dirección			
Áreas de Actividad	tipo de actividad	2014	IDESC - POT	.shp

Fuente: Elaboración propia con datos de las vías de Santiago de Cali obtenidas de la IDESC

5.3 PROCESAMIENTO DE DATOS

Los accidentes peatonales son eventos que deben ser estudiados desde un concepto multicausal. Esto quiere decir que se deben tener en cuenta varios factores para analizar el comportamiento de este fenómeno. Por lo tanto, se consideran otras variables independientes adicionales a la infraestructura vial, con el fin de generar un análisis más profundo. A continuación, se exponen las variables a utilizar y el procesamiento de las mismas.

5.3.1 Variable dependiente, Número de accidentes peatonales: a partir de los registros de accidentes de tránsito en Santiago de Cali, se realiza un proceso de revisión y depuración con el fin de evaluar la calidad de los datos. En este proceso se buscan ambigüedades, errores y repetición de registros. Posterior al proceso de depuración, se realiza la selección de accidentes peatonales. Esta selección se basa en los siguientes criterios:

- Selección de actor víctima: Peatón.
- Selección de atributos como: id accidente, año, mes, día, hora evento, edad, sexo, escolaridad, tipo de vehículo implicado, severidad, barrio y dirección del evento.
- Selección de los registros de accidentes con base en el grado de severidad (lesionados y muertos) entre los años 2008 y 2013.

La serie de registros obtenidos para el proceso de selección se denomina: la base de registros de accidentes peatonales de la ciudad de Santiago de Cali entre los años 2008 y 2013 (BD-AP). Estos registros seleccionados se localizan en la zona de estudio, y con el fin de conocer la distribución espacial de los mismos, se implementa un proceso de geo-codificación.

La geo-codificación se implementa cuando los datos o registros no están asociados con coordenadas de un sistema de referencia geográfico sino con una dirección. En este estudio, los datos de la BD-AP cuentan con direcciones asociadas a cada registro de accidente peatonal. Por lo tanto, se hace necesario transformar esas direcciones a coordenadas. Este proceso es implementado en investigaciones relacionadas con accidentes peatonales (Medina, 2015; Vieira, 2013; Moudon, Lin, JiaoM, Hurvitz, & Reeves, 2011). En este proyecto se trabaja con el servicio web de geo-codificación

de Google Maps, ya que ofrece una plataforma amigable y de libre acceso para la geo-codificación de direcciones.

El uso del geo-codificador de Google Maps requiere de una serie de pasos. En primer lugar, se realiza una normalización de las direcciones asociadas a los registros de accidentes peatonales, ya que vienen representados en diferentes formatos. En segundo lugar, se ingresan las direcciones normalizadas al geo-codificador, con el que se obtienen las coordenadas geográficas de cada uno de los registros. En tercer lugar, se realiza un último proceso de depuración, ya que se eliminan los registros que no cuentan con información en el atributo de dirección o poseen errores de digitación.

Posteriormente, los datos obtenidos a partir del geo-codificador son coordenadas geográficas de cada uno de los AP (Accidentes Peonales) en formato de tabla. Además, en esta tabla se encuentran asociados los atributos mencionados en el proceso de selección (id accidente, año, mes, día, hora evento, edad, sexo, escolaridad, tipo de vehículo implicado, severidad, barrio y dirección del evento) con los que se realiza el análisis de estadística descriptiva (medidas de tendencia central y de dispersión) el cual permite responder al cuestionamiento sobre quiénes son los involucrados en los accidentes peatonales.

Por otra parte, todos los registros en la tabla se transforman a entidades geográficas de tipo punto (formato *.shp*) con el fin de conocer dónde ocurren los accidentes peatonales en la ciudad. Además, se utiliza el método de densidad de kernel (ecuación 1) para representar las zonas críticas o puntos focales de los accidentes peatonales a partir del algoritmo de radio de búsqueda (ecuación 2) implementado en la función de *kernel density* del software *ArcGIS*®. 10.1.

Finalmente, se agregan los puntos de accidentes peatonales a cada polígono de barrio, utilizando como criterio la ubicación. Esto quiere decir que todos los puntos dentro de los límites de un barrio serán agregados al mismo barrio, teniendo presente que tanto los accidentes (puntos) como los barrios (polígonos) deben contar con el mismo sistema de referencia (EPSG 3115 - Magna Colombia Oeste). Igualmente, se realiza una clasificación de los barrios a partir del método *natural breaks (Jenks)* del software *ArcGIS*®. 10.1. Además, se evalúa si existe o no la autocorrelación espacial del fenómeno a nivel global por medio del índice de Moran (ecuación 3) y a nivel local mediante el método LISA (ecuación 4), ambos implementados en el software *GeoDa*®.

5.3.2 Variables independientes: las variables utilizadas en el presente estudio son agregadas a nivel de barrio y se clasifican en cuatro grupos: patrones de red vial (Índice de integración global, índice de centralidad entres redes), facilidades de transporte (número de intersecciones semaforizadas, puntos de parada del sistema integrado de transporte masivo, MIO), operación vial (velocidad promedio) y usos del suelo urbano (residencial, mixto). Estas variables han sido utilizadas ampliamente en la literatura, obteniendo resultados satisfactorios en cada estudio relacionado con accidentes peatonales (Zhang, Bigham, Li, & Ragland, 2012; Lam, Yao, & Loo, 2014; Guo, Xu, Pei, Wong, & Yao, 2017).

5.3.2.1 Patrones de red vial: los patrones de red vial en este proyecto se consideran parte de las características físicas de la infraestructura vial. Por tanto, se identifican a partir del cálculo de una

serie de medidas topológicas como: profundidad media (ecuación 5), índice de integración global (ecuación 6) y el índice de centralidad entre redes (ecuación 8). Estos indicadores han sido planteados en estudios de seguridad vial relacionados con peatones (Guo, Xu, Pei, Wong, & Yao, 2017; Zhang, Bigham, Ragland, & Chen, 2015).

Antes de calcular los indicadores de patrones viales, se debe obtener la red vial correspondiente a cada barrio (334 unidades) por medio de un geo-proceso de *intersección* entre los recursos de entrada de *red vial.shp* y *barrios.shp*. Posteriormente, se realiza una revisión topológica de cada una de las 334 redes viales obtenidas en el proceso anterior, ya que todos los nodos de las redes evaluadas deben estar conectados entre sí y evitar ambigüedades en los límites de los barrios. Después de tener las redes viales sin ambigüedades, se calculan cada uno de los indicadores de patrones de red vial por medio del software *DepthmapX*®. Finalmente, se establecen los rangos de clasificación para los índices de integración global y centralidad entre redes, a partir del método *natural breaks (Jenks)* del software *ArcGIS*®. 10.1.

5.3.2.2 Facilidades de transporte: hacen referencia a algunos elementos de la infraestructura vial con la que cuenta cada barrio de la ciudad. Para este estudio, las facilidades de transporte corresponden al número de intersecciones semaforizadas y el número de puntos de parada del sistema de transporte masivo MIO en cada barrio. Las intersecciones semaforizadas son ubicaciones donde interactúa el tráfico y los peatones, por tanto, se generan conflictos entre los actores viales (Dumbaugh & Zhang, 2013). Por otra parte, los puntos de parada del sistema MIO son considerados ya que son ubicaciones a las que los peatones deben desplazarse para acceder al transporte público. Estos puntos son ubicados en todos los barrios de la ciudad y son clasificados según su estructura (estación, cobertizo, revistero), dicha clasificación se establece según la guía del diseño de transporte masivo. Por tanto, en el presente estudio se tendrán en cuenta todos los tipos de puntos de acceso al sistema de transporte masivo, ya que implican desplazamientos por parte de los peatones.

Para obtener las variables correspondientes a facilidades de transporte, se utilizan los recursos de *intersecciones semaforizadas.shp* y *puntos de parada MIO.shp*, los cuales deben ser agregados para cada barrio teniendo en cuenta el periodo 2009-2013. Por último, se clasifican estas variables a partir del método *natural breaks (Jenks)* del software *ArcGIS*®. 10.1.

5.3.2.3 Característica de operación vial: la variable de operación vial utilizada en este estudio es la velocidad promedio en la red vial de cada barrio de la ciudad, algunos estudios de seguridad vial con peatones han utilizado esta variable, pero con diferentes métodos de cálculo (Aguero-Valverde & Jovanis, 2008; Dumbaugh & Zhang, 2013; Lam, Yao, & Loo, 2014).

La red vial de Santiago de Cali cuenta únicamente con atributos de velocidades para las vías primarias y secundarias. Por tanto, según Reina y Rojas (2016) las velocidades de las vías colectoras y locales pueden ser calculadas a partir de un modelo que relaciona las velocidades tomadas en campo con las velocidades capturadas en Google Maps. El modelo de Reina y Rojas es el que se implementó para el cálculo de las velocidades en los segmentos de las redes viales. Se recopilaron valores de velocidad por medio del servicio de Google Maps, los cuales se ingresan al modelo (ecuación 9) y son

promediados (promedio simple) para cada barrio de la ciudad. Finalmente, se establecen rangos de clasificación por medio del método *natural breaks (Jenks)* del software *ArcGIS® 10.1*.

5.3.2.4 Usos del suelo urbano: son parte esencial para la movilidad de las personas, ya que permiten que estas interactúen con las actividades que se producen en cada uso del suelo, por ejemplo: el estudio, el trabajo, el comercio etc. Así mismo, los usos de suelo están definidos mediante el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del municipio: residencial neto, residencial predominante, mixto, industrial, equipamientos, espacio público entre otros. En este estudio se analizan los usos de suelo residencial (unión de los usos residencial neto y residencial predominante) y mixto (reúnen actividades comerciales y servicios) como se ha implementado en algunos estudios relacionados con seguridad vial de peatones (Marshall & Garrick, 2011; Lam, Yao, & Loo, 2014; Guo, Xu, Pei, Wong, & Yaa, 2017). Por tanto, considerar este tipo de variables resulta significativo, ya que aportan información respecto a las actividades que se desarrollan sobre el suelo de cada unidad de análisis (barrio), siendo factores a tener en cuenta para actores de la vía como los peatones.

Los datos de usos de suelo son obtenidos a partir del recurso *Áreas de Actividad. shp*, el cual contiene información referente al tipo de actividad por manzana. Para este trabajo se tendrán en cuenta el número de lotes con actividad residencial o mixta en cada barrio y se aplicará una clasificación a partir del método *natural breaks* del software *ArcGIS® 10.1*.

Por último, se muestra en la Tabla 4, el resumen de las variables a implementar en el presente estudio con su respectiva unidad de medida:

Tabla 4. Lista de resumen de variables

Categoría	Variable	Descripción	Unidad de medida
<i>Variable dependiente:</i>			
Número de accidentes peatonales	APxBarrío	Número de accidentes peatonales por barrio periodo 2008 - 2013	No. Accidentes peatonales / barrio
<i>Variables Independientes:</i>			
Patrones de red vial	GI	Índice de integración global	Decimal / barrio
	CE	Índice de centralidad entre redes	
Facilidades de transporte	NoIS	Número de intersecciones semaforizadas	No. Intersecciones sem / barrio
	NoPPM	Número de puntos de parada sistema MIO	No. Puntos parada MIO / barrio
Operación Vial	Vel	Velocidad promedio	Velocidad promedio (km/h) / barrio
Usos del suelo urbano	NoLotRes	Residencial	No. Lotes residencial / barrio
	NoLotMix	Mixto	No. Lotes mixto / barrio

5.4 ESTIMACIÓN DEL MODELO DE REGRESIÓN GEOGRÁFICAMENTE PONDERADA DE POISSON (GWPR)

El modelo GWR (Regresión Geográficamente Ponderada) tiene en cuenta la variación o heterogeneidad espacial entre accidentes peatonales y factores de la infraestructura vial, generando resultados más precisos (Zhang, Bigham, Li, & Ragland, 2012). Esto quiere decir que el GWR reconoce la existencia de variaciones espaciales en los accidentes peatonales, a partir de la calibración del modelo de regresión. Sin embargo, los datos de accidentes peatonales se presentan como datos de conteo, por tanto una regresión de Poisson junto con GWR es comúnmente usada para ajustar los datos espaciales de tipo conteo como los accidentes (Li, Wang, Liu, Bigham, & Ragland, 2013).

El modelo GWPR (Regresión Geográficamente Ponderada de Poisson) es un modelo de regresión que permite modelar y explorar las relaciones espaciales con el fin de comprender los posibles factores que las generan (Li et.al, 2013). Este modelo se adapta a la regresión de Poisson, la cual se encarga de aproximar datos de conteo tales como la ocurrencia de accidentes de tránsito (Timbó et.al, 2017). Por tanto, el modelo es apropiado para el fenómeno del presente estudio, ya que el número de accidentes peatonales (variable dependiente) es de tipo conteo.

El primer proceso en la construcción del modelo GWPR se refiere a la selección de variables, en este proceso se analiza la normalidad de la variable dependiente y las variables independientes por medio de la prueba Shapiro - Wilk (ecuación 10). De modo que se evalúe el supuesto de normalidad de cada una de las variables planteadas en este estudio. Posteriormente, se procede a generar una matriz de correlación de Spearman (ecuación 11) que permita identificar las correlaciones entre el número de accidentes peatonales y cada una de las variables independientes de la infraestructura vial. Por lo tanto, la selección de las variables se basa en tres criterios: el valor de correlación debe ser superior a 0.5 entre la variable dependiente y las variables independientes, la correlación debe ser significativa ($p\text{-value} < 0.05$) y no debe existir correlación entre las variables independientes (multicolinealidad).

Con las variables seleccionadas se procede a calcular un modelo lineal generalizado (ecuación 12) con el fin de identificar si el fenómeno de los accidentes peatonales puede estimarse de forma global (coeficientes fijos). Posteriormente, se procede a calcular el modelo GWPR (ecuación 13) que explica las relaciones espaciales de forma local (coeficientes variables). Es necesario calcular los dos modelos para entender cuál de los dos explica mejor el fenómeno de los accidentes peatonales, de modo que se utiliza el *estadístico t* para analizar el nivel de significancia de los coeficientes, la *desviación* para evaluar el nivel de ajuste de los modelos, el *porcentaje de desviación explicado* para el rendimiento y el *criterio AICc* (ecuación 14) para comparar los modelos. Por último, se realiza una prueba de variabilidad geográfica (ecuación 15) la cual permite determinar si el fenómeno de los accidentes peatonales se ajusta a un modelo con variación espacial.

Finalmente, se utiliza el índice de Moran (ecuación 3) para analizar la configuración espacial global de los residuales del modelo GWPR, la cual debe ser aleatoria, de modo que el error sea distribuido aleatoriamente sobre el espacio.

6. RESULTADOS

6.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS ACCIDENTES PEATONALES EN SANTIAGO CALI

La caracterización de los accidentes peatonales se realizó a partir de un proceso previo de depuración de la base de datos de accidentes de tránsito ocurridos en Santiago de Cali, la cual fue suministrada por la Corporación Fondo de Prevención Vial (CFPV). Esta base de datos contiene 18,333 registros de accidentes de todo tipo (accidentes peatonales, choques entre vehículos, volcamientos etc.) que solamente hayan dejado como saldo muertos o lesionados en la zona urbana y rural del municipio durante el periodo de 2004 a 2014. Por lo cual, se realizó un proceso de selección (ver sección 5.3.1) que permitiera extraer únicamente los registros que estuviesen relacionados con accidentes peatonales.

El número de registros iniciales seleccionados fue de 3,210 accidentes peatonales (BD-AP) para la zona urbana del municipio, que dejaron como víctima al peatón durante el periodo 2008-2013. Los atributos contenidos en cada registro son: id accidente, año, mes, día, hora evento, edad, sexo, escolaridad, tipo de vehículo implicado, severidad, barrio y dirección. Estos atributos permiten realizar un análisis descriptivo del fenómeno de los accidentes peatonales y conocer su distribución espacial (agrupado, disperso o aleatorio) por medio de un proceso de geo-codificación.

El proceso de geo-codificación se implementó para los 3,210 registros de accidentes peatonales seleccionados inicialmente. Los resultados de dicho proceso son 2,510 registros de accidentes geo-codificados (tabla 5), es decir que un 78% de los accidentes peatonales tienen asignadas coordenadas y el 22% restante no pudo ser geo-codificado debido a que no contaban con el atributo de la dirección del accidente o el geo-codificador no logró reconocerlo.

Tabla 5. Resultados de Geo-codificación

Accidentes Peatonales			%
2008-2013	Iniciales	3,210	100
	Geo-codificados	2,510	78
	Perdidos	700	22

Por lo tanto, el análisis descriptivo y el análisis exploratorio de datos espaciales se desarrollaron sobre los registros geo-codificados (2,510).

6.1.1 Análisis estadístico descriptivo: el número total de registros de accidentes de tránsito ocurridos durante los años 2008-2013 corresponde a 14,658 casos. A partir de dichos casos, se seleccionaron 2,510 registros de accidentes que reportaron como víctima (lesionados o muertos) a peatones dentro de la ciudad, esto quiere decir que aproximadamente el 17 % de los accidentes de tránsito ocurridos han involucrado peatones.

Los accidentes peatonales durante el periodo 2008-2013 han tenido una tendencia decreciente (figura 6), con un coeficiente de variación del 9%, el cual indica que el número de accidentes peatonales desde 2008 no ha tenido variaciones significativas. El mayor número de accidentes peatonales corresponde al año 2010 con un 18% (461) del total de accidentes en este periodo y el año con menor número de accidentes corresponde al año 2013 con un 14% (347).

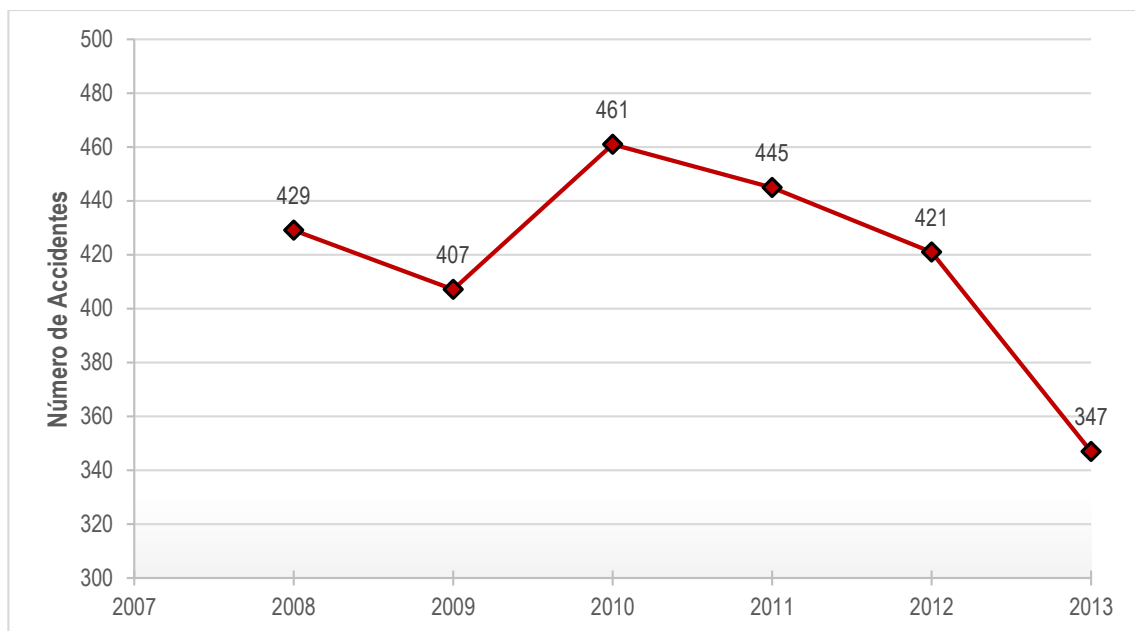


Figura 6. Histórico de accidentes peatonales en Santiago de Cali 2008-2013

Fuente: Elaboración propia con base en registros de accidentes del CFPV.

En relación con la severidad de los accidentes, se obtiene que aproximadamente el 77% (1,931) de los accidentes peatonales en el periodo de estudio corresponde a peatones lesionados y el 23% restante (579) a peatones muertos. Sin embargo, se debe aclarar que para este estudio no se tuvo en cuenta la clasificación KSI (Killed or Seriously Injuries), ya que la base de datos de accidentes utilizada no cuenta con los atributos necesarios: lesiones por grados (grave o leve) y los rangos de tiempo que permitan clasificar por tipo de muerte (en el sitio o durante intervención hospitalaria). Por lo tanto, en este estudio solo se consideran dos grados de severidad: muerto o lesionado.

La severidad de los accidentes peatonales (figura 7) se analizó por medio de peatones lesionados y peatones muertos. Los peatones lesionados son aquellos que representan el mayor porcentaje (77 %) de los registros de accidentes peatonales con una media de 322 lesionados por año. Por otra parte, los peatones muertos representan el 23% de los accidentes peatonales con una media de 97 muertos por año durante el periodo 2008-2013.

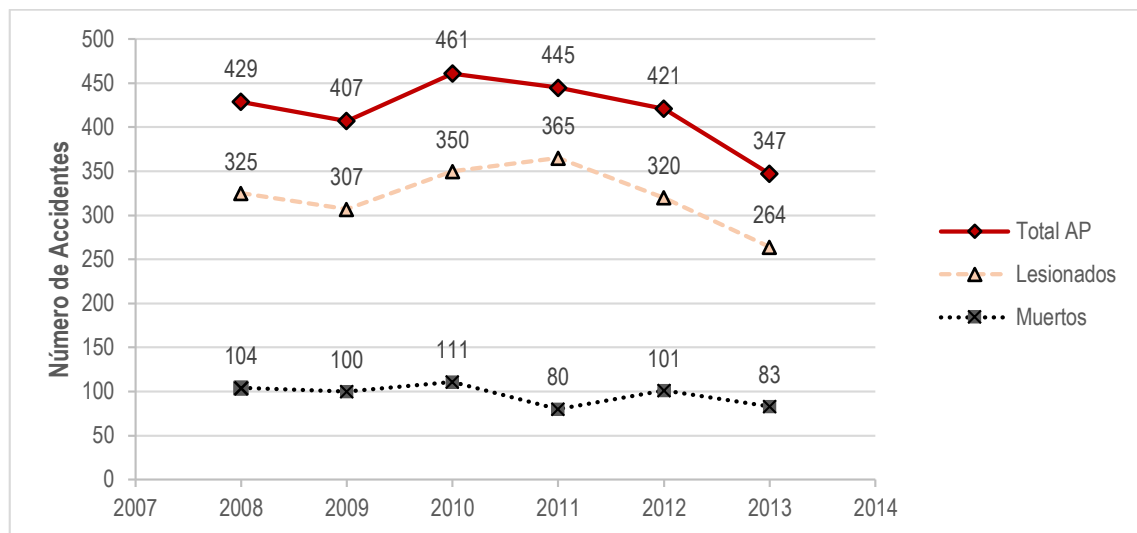


Figura 7. Accidentes peatonales según año y severidad en Santiago de Cali 2008-2013.

Fuente: Elaboración propia con base en registros de accidentes del CFPV.

Con respecto a la temporalidad (mes, día y hora de ocurrencia) y la severidad (lesionados y muertos), se evidencia que el mes con mayor cantidad de peatones lesionados corresponde a junio (figura 8), el cual reportó un 10% (190) del total de lesionados; el promedio mensual de peatones lesionados en accidentes fue de 160 casos. Por otra parte, el mes con mayor cantidad de peatones muertos corresponde a agosto con un 11% (63) del total de muertes, así mismo, el promedio de peatones muertos por mes fue de 48 casos durante los años 2008 y 2013.

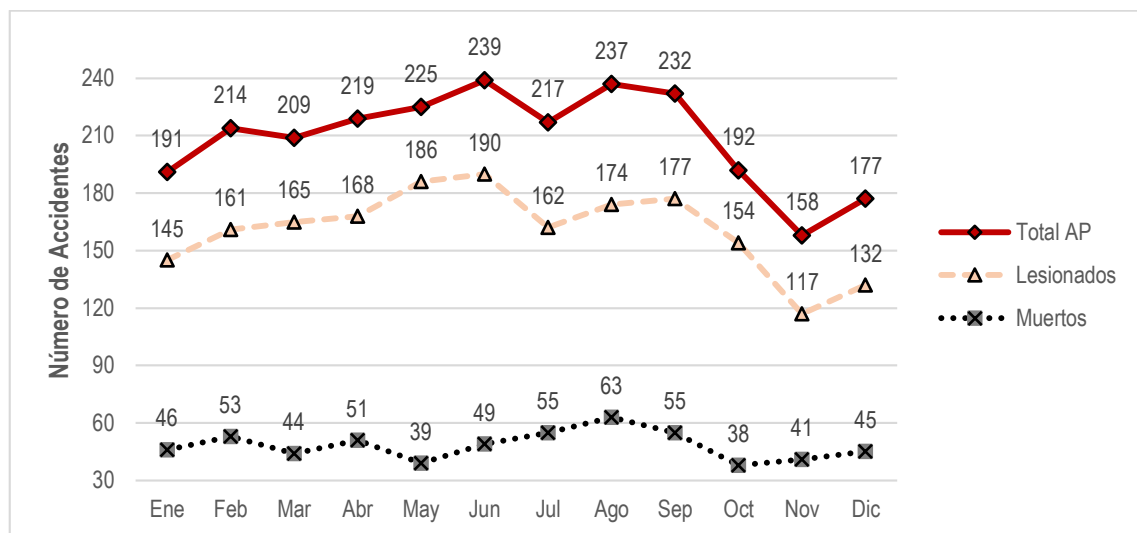


Figura 8. Accidentes peatonales según mes y severidad en Santiago de Cali 2008-2013

Fuente: Elaboración propia con base en registros de accidentes del CFPV.

El día con mayor frecuencia de accidentes peatonales (AP) ha sido el sábado (figura 9), el cual presentó un 18% (445) del total de accidentes registrados. El día que menor ocurrencia de accidentes peatonales reporta es el día jueves, en este día se presentó el 12% (300) del total de accidentes.

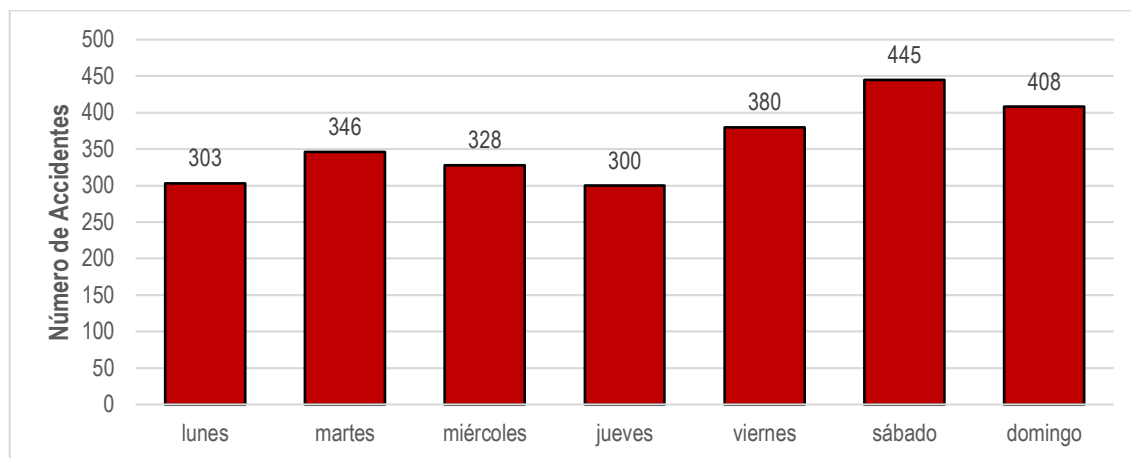


Figura 9. Accidentes peatonales según día en Santiago de Cali 2008-2013.

Fuente: Elaboración propia con base en registros de accidentes del CFPV.

La franja horaria entre las 12:00-18:00 horas es la que mayor ocurrencia de accidentes peatonales reporta con un 33% (830), es decir que los accidentes peatonales se han presentado en mayor proporción durante las horas de la tarde (figura 10). Así mismo, la franja horaria con menor ocurrencia de accidentes peatonales fue entre las 0:00-6:00 horas con un 9% (233), es decir que los accidentes se presentaron en menor proporción durante las horas de la madrugada.

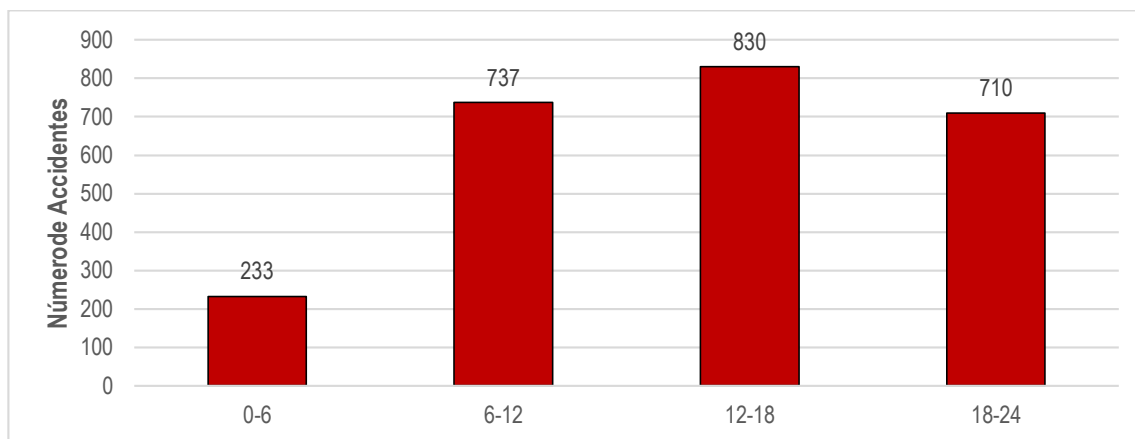


Figura 10. Accidentes peatonales según franja horaria en Santiago de Cali 2008-2013.

Fuente: Elaboración propia con base en registros de accidentes del CFPV.

En cuanto al sexo y grupo de edad de los peatones que estuvieron involucrados en accidentes peatonales se evidencia que los adultos (peatones entre los 27 y 59 años de edad) y los adultos mayores (peatones mayores a 60 años de edad) han sido los dos grupos más afectados, con un 40% (1014) y un 27% (669) del total de accidentes, respectivamente (figura 11). Por otra parte, se observa

que los hombres (M) han tenido una mayor participación en los accidentes peatonales en comparación con las mujeres (F): los hombres reportan un 56% (1,411) y las mujeres un 44% (1,059) en el total de accidentes durante el periodo de estudio.

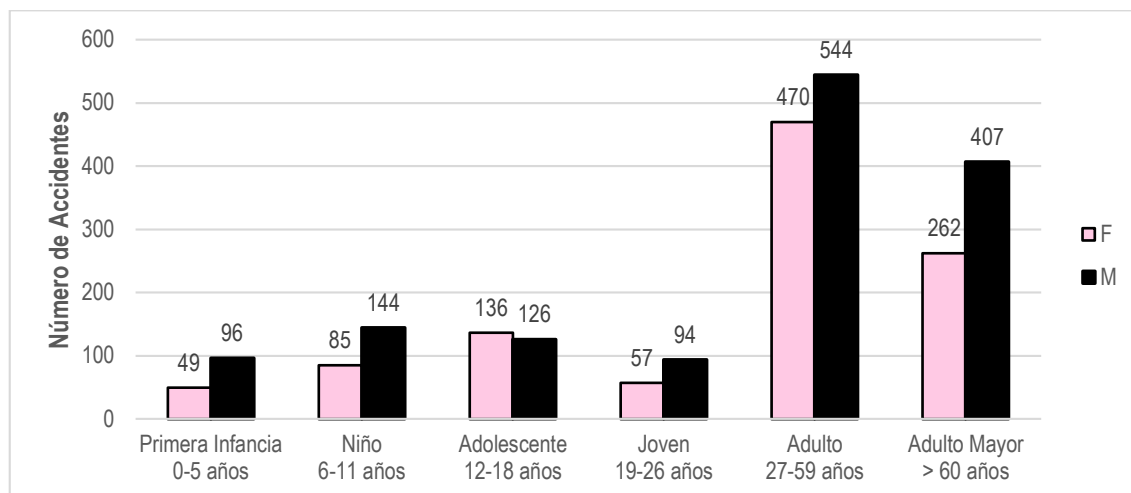


Figura 11. Accidentes peatonales según grupo de edad y sexo en Cali 2008-2013.

Fuente: Elaboración propia con base en registros de accidentes del CFPV.

Con relación al nivel de escolaridad de los peatones involucrados en accidentes de tránsito, la figura 12 muestra que aproximadamente el 36% (898) cuenta con el nivel de básica primaria, es decir, para la mayoría de los peatones accidentados, el nivel de escolaridad no es alto. De igual forma se evidencia que el nivel de básica secundaria y secundaria alta son los niveles de escolaridad que siguen en proporción a los de básica primaria, con un 18% (459) y un 15% (377) respectivamente. Finalmente, los niveles de escolaridad con menor proporción han sido el nivel de especialización y maestría con un 0.4% (11) y el nivel de doctorado con un 0.03% (1).

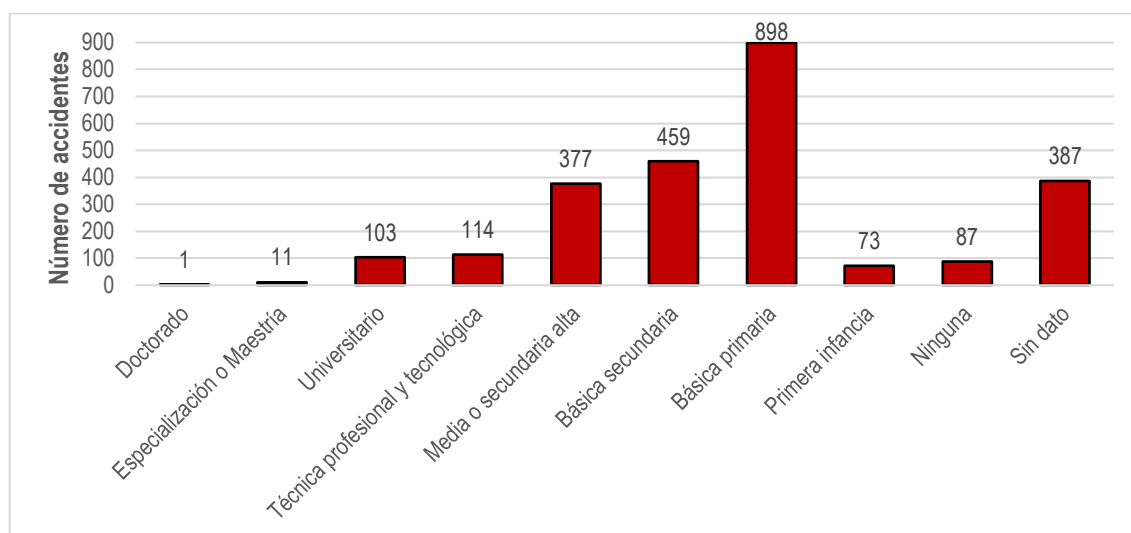


Figura 12. Accidentes peatonales según escolaridad en Santiago de Cali 2008-2013.

Fuente: Elaboración propia con base en registros de accidentes del CFPV.

En relación con los vehículos que se ven involucrados en accidentes peatonales se debe entender el tipo de servicio de transporte que prestan. Se observó que el transporte privado cuenta con un gran porcentaje de participación en los accidentes peatonales (figura 13), el cual reportó un 75% (1,839) del total de casos, de igual forma, el transporte público obtuvo un porcentaje de 16% (408), el cual se encuentra por encima del transporte de carga con 3% (71) y otros con 6% (149).

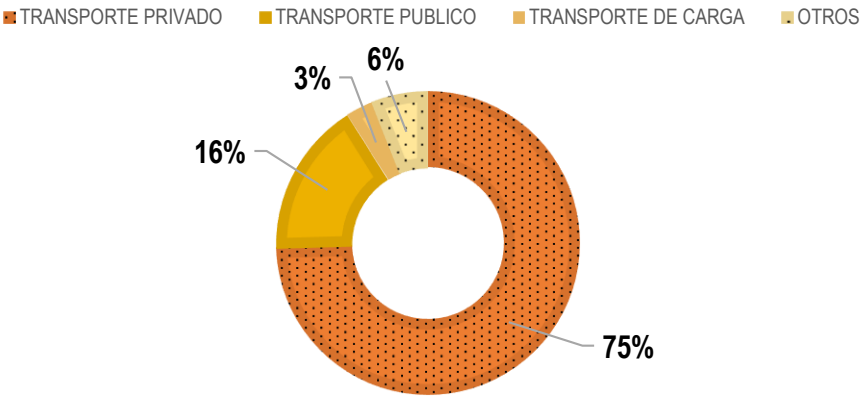


Figura 13. Accidentes peatonales según el tipo de servicio que prestan los vehículos involucrados
Fuente: Elaboración propia con base en registros de accidentes del CFPV.

En cuanto al tipo de vehículo se evidenció que las motocicletas (figura 14) han sido los vehículos que mayor participación han tenido en los accidentes peatonales. Este tipo de vehículo estuvo presente en 1,122 casos que representan un 45% del total de accidentes, cerca de la mitad de los mismos. A su vez, el automóvil representa el 22% (553) del total de accidentes, siendo el segundo vehículo con mayor participación.

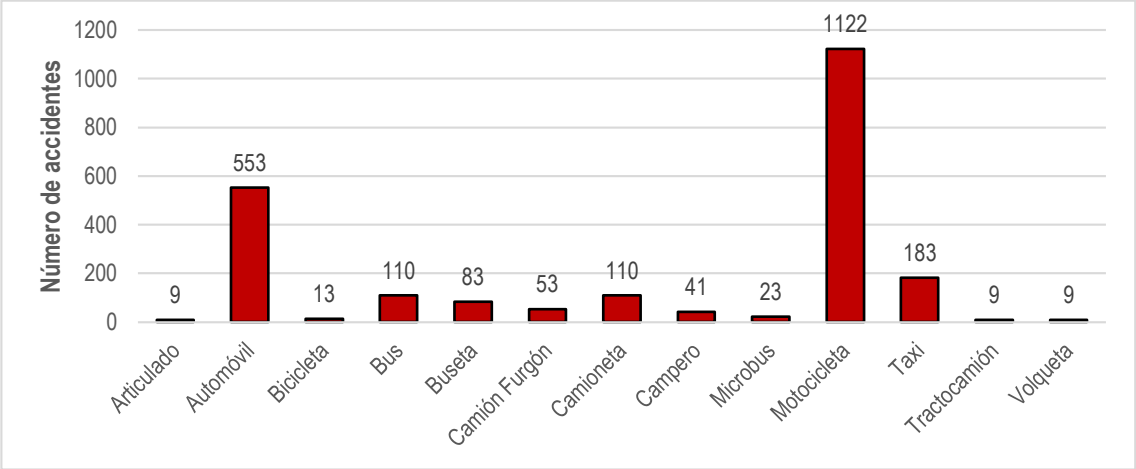


Figura 14. Accidentes peatonales según el tipo de vehículos involucrados
Fuente: Elaboración propia con base en registros de accidentes del CFPV.

Finalmente, el análisis estadístico describe quiénes son los involucrados en el fenómeno de los accidentes peatonales en Santiago de Cali, por medio de los atributos asociados a cada accidente. Sin embargo, dicho análisis no especifica dónde ocurren los accidentes peatonales en la ciudad. Por lo tanto, se implementó un análisis exploratorio de datos espaciales.

6.1.2 Análisis Exploratorio de Datos Espaciales: Los registros de accidentes peatonales tienen asociadas coordenadas que son representadas con entidades geográficas de tipo punto. Por tanto, se realizó un análisis de densidad de Kernel, el cual muestra las zonas de mayor frecuencia de accidentes peatonales en Santiago de Cali a partir de la cantidad de accidentes por unidad de área. El valor de unidad de área se representa por medio de un radio de búsqueda de 400 metros, ya que es la distancia óptima planteada por el algoritmo de radio de búsqueda (ecuación 2) a partir de los datos de entrada (2,510 puntos) de accidentes peatonales. Igualmente, algunos estudios han planteado que los peatones están dispuestos a recorrer distancias de 300 hasta 500 metros para realizar sus actividades cotidianas (Pulugurtha et.al, 2007).

Los resultados obtenidos con el método de densidad de Kernel son representados en la figura 15, la cual muestra las zonas críticas de accidentes peatonales en Santiago de Cali. La zona central y oriental de la ciudad son las que mayor número de casos presentaron durante el periodo 2008-2013. Estas zonas están representadas por tonalidades más oscuras que se clasifican con un nivel medio-alto y alto de densidades, es decir que muestran una mayor concentración de accidentes peatonales. En consecuencia, resulta importante explicar por qué estas zonas de la ciudad presentan un mayor número de casos en comparación con otras. Por lo cual, los puntos de accidentes peatonales son agregados a nivel de barrio, ya que las entidades geográficas de tipo polígono permiten agrupar una serie de variables que pueden llegar a explicar dicho fenómeno (Siddiquia, Abdel-Atya, & Choi, 2012).

El número de barrios que se tienen en cuenta para el presente estudio es de 334, los cuales son representados por entidades geográficas de tipo polígono. En la figura 16 se muestra el mapa de distribución espacial según el número de accidentes peatonales por barrio. En el mapa se observan cuatro intervalos de clase que se podrían clasificar como: muy bajo (0 - 8), bajo (8 - 16), medio (16 - 25), alto (25 - 33) y muy alto (33 - 42). En el caso de las unidades espaciales con nivel bajo, es decir entre 0 y 10 accidentes peatonales, se puede afirmar que son los barrios que ocupan la zona sur, zona occidental y la mayor parte de la zona norte en la ciudad. En cuanto a los niveles medio y alto, entre 11 y 32 accidentes, logran resaltar los barrios de las zonas oriental y central de la ciudad con un número mínimo de barrios en las zonas occidental y norte. Finalmente, el nivel muy alto con un rango de accidentes peatonales entre 33 y 43 casos, se encuentra claramente definido en las zonas oriental y centro del municipio. Los barrios con mayor número de casos son: Sucre (42), Antonio Nariño (41), Nueva Floresta (37), Alfonso López III (35), Los comuneros I (35), San Nicolás (34), Ciudad Córdoba (34), Mojica (32), Obrero (31) y Guayaquil (31).

En resumen, las zonas con mayor frecuencia de accidentes peatonales entre los años 2008-2013 son la zona oriental y centro de la ciudad, en contraste con las zonas sur, occidental y norte que presentan menor número de casos. Por otra parte, se debe conocer si la distribución espacial de los accidentes peatonales se produce de forma aleatoria o si existe una configuración espacial que la represente. Por tanto, se realizó un análisis de auto-correlación espacial a partir del índice de Moran (ecuación 3) y el método de LISA (ecuación 4).

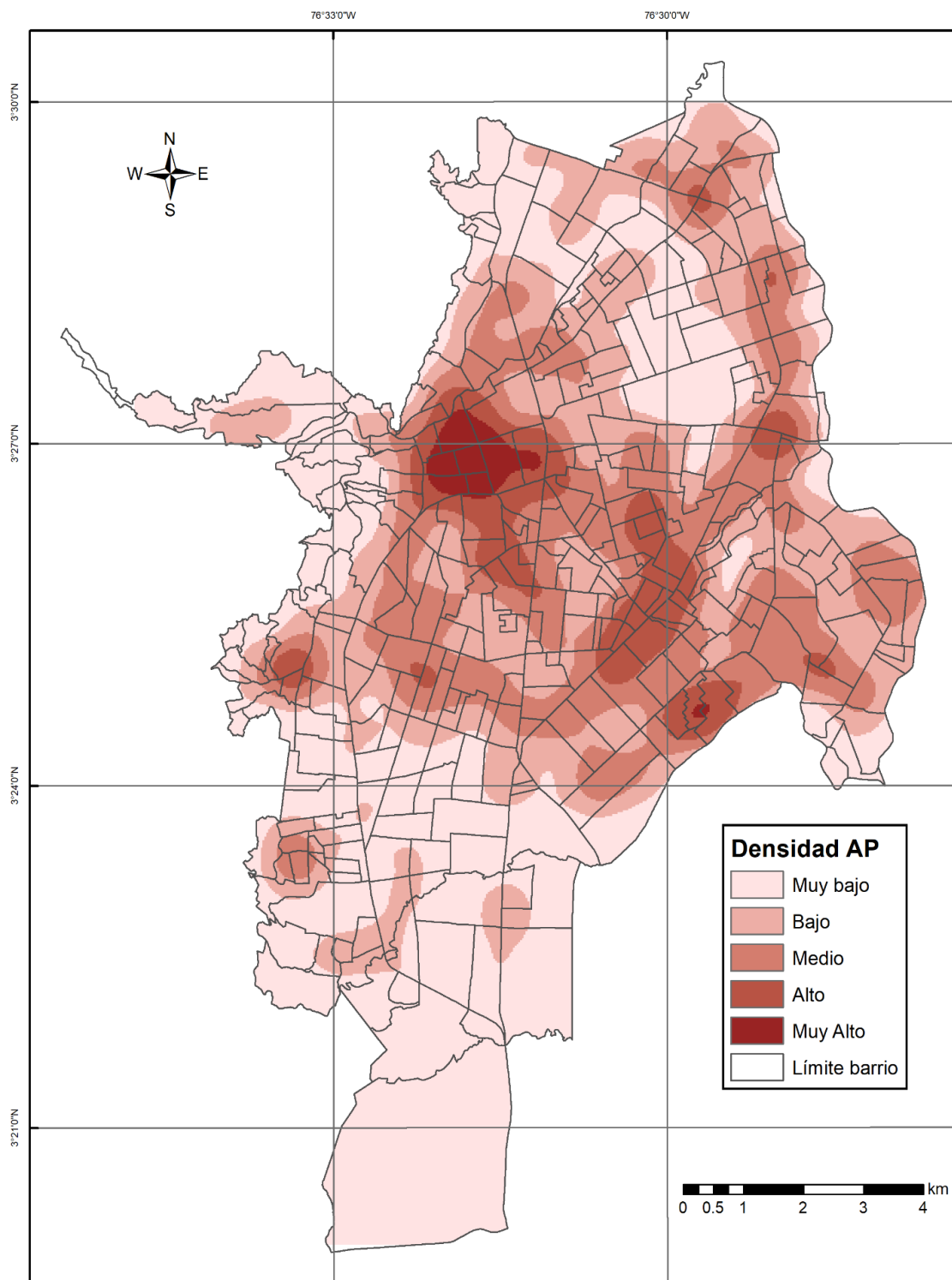


Figura 15. Mapa de densidades Kernel de los accidentes peatonales 2008-2013 en Santiago de Cali.
Fuente: Elaboración propia con base en registros de accidentes peatonales CFPV

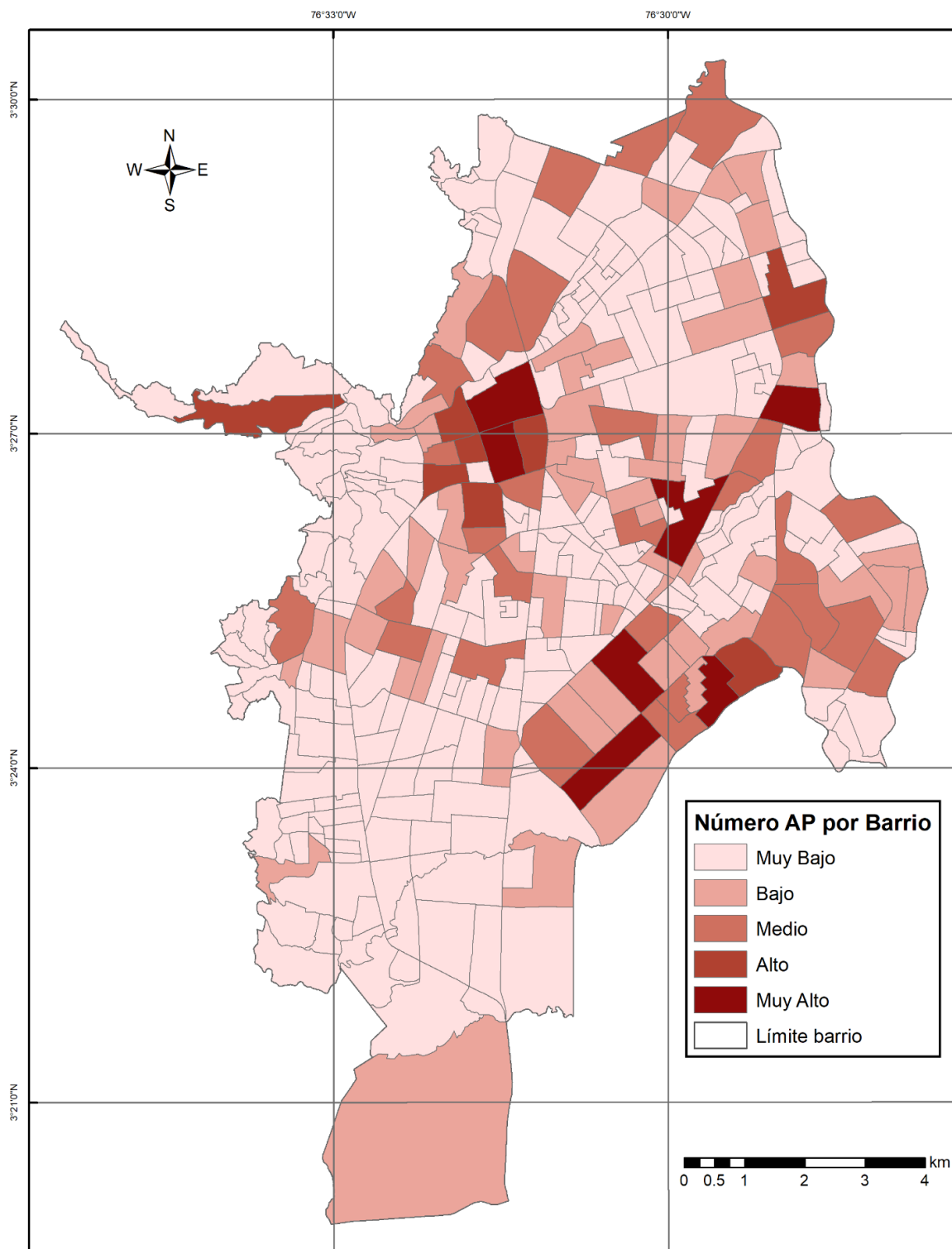


Figura 16. Mapa de distribución espacial de los accidentes peatonales por barrio 2008-2013.
Fuente: Elaboración propia con base en registros de accidentes peatonales del CFPV

El índice de Moran se calculó para los valores de la variable número de accidentes peatonales en cada barrio de la ciudad, el cual obtuvo un valor de 0.2999 (figura 17) siendo un valor aceptable dentro del rango esperado del índice (-1 y 1), además, el valor obtenido representa el sentido positivo de la recta de regresión, es decir que los datos presentan una auto-correlación espacial positiva.

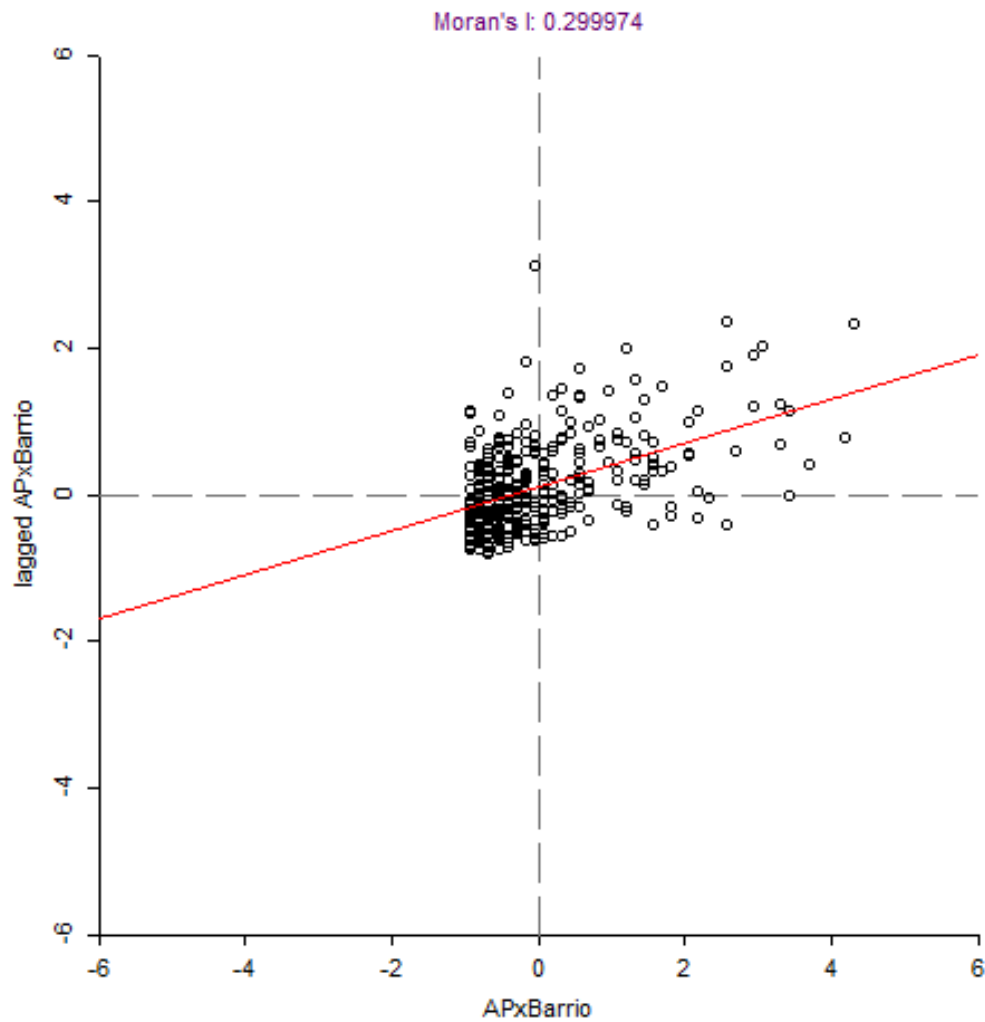


Figura 17. Índice de Moran de accidentes peatonales por barrio durante 2008-2013
Fuente: Elaboración propia con base en registros accidentes peatonales del CFPV.

El análisis de autocorrelación espacial se profundizó a través de la realización de un test de significancia mediante un cálculo de 999 permutaciones, el cual confirma o rechaza la hipótesis nula (la configuración espacial de los accidentes peatonales se produce de forma aleatoria) por medio del “valor p”. Este valor muestra cuan probable es que el índice de Moran sea producto del azar. Sin embargo, el valor p en este caso fue de 0.001, es decir que el índice de Moran obtenido en el presente estudio no representa una configuración espacial aleatoria, puesto que el máximo valor aceptable de p corresponde a 0.05, por tanto, se puede rechazar la hipótesis nula.

Con el fin de complementar el análisis de auto-correlación espacial, se realizó el cálculo del método LISA, el cual descompone el índice de Moran a un nivel local e identifica la formación de clúster (agrupamientos) de las unidades espaciales (barrios) en la ciudad. Así que se obtuvo como resultado un mapa de significancia (figura 18a) y un mapa de clúster (figura 18b). En el mapa de significancia se muestra el nivel de la relación entre cada barrio con sus vecinos, en el que se observa que ninguno de los barrios presenta una relación de vecindad muy alta ($p=0.0001$ o $p=0.001$), pero la zona oriental, sur-occidental y centro de la ciudad toman valores entre $p=0.01$ (19 barrios) y $p=0.05$ (48 barrios), es decir que en dichas zonas de la ciudad se presentan concentraciones de barrios con relaciones de vecindad significativas.

En la figura 18a se evidenció que existen relaciones de vecindad significativas entre los barrios por medio del mapa de significancia, pero no se especifica el tipo de relaciones. En consecuencia, la figura 18b muestra el tipo de relaciones a partir del mapa de clúster, agrupándolas en cuatro clases: alto-alto, alto-bajo, bajo-alto y bajo-bajo; por medio de dichas clases se muestra claramente que los barrios contenidos en la zona norte, sur y occidental (19 barrios) han sido agrupados con barrios que presentan bajos valores, es decir que estos barrios con bajos niveles de accidentes peatonales tienen como vecinos a barrios que también poseen bajos niveles de accidentes. Por otra parte, los barrios contenidos en la zona oriental y centro de la ciudad (34 barrios) son agrupados con barrios de altos valores, es decir que los barrios con altos niveles de accidentes peatonales tienen como vecinos a barrios que también tienen altos niveles de accidentes.

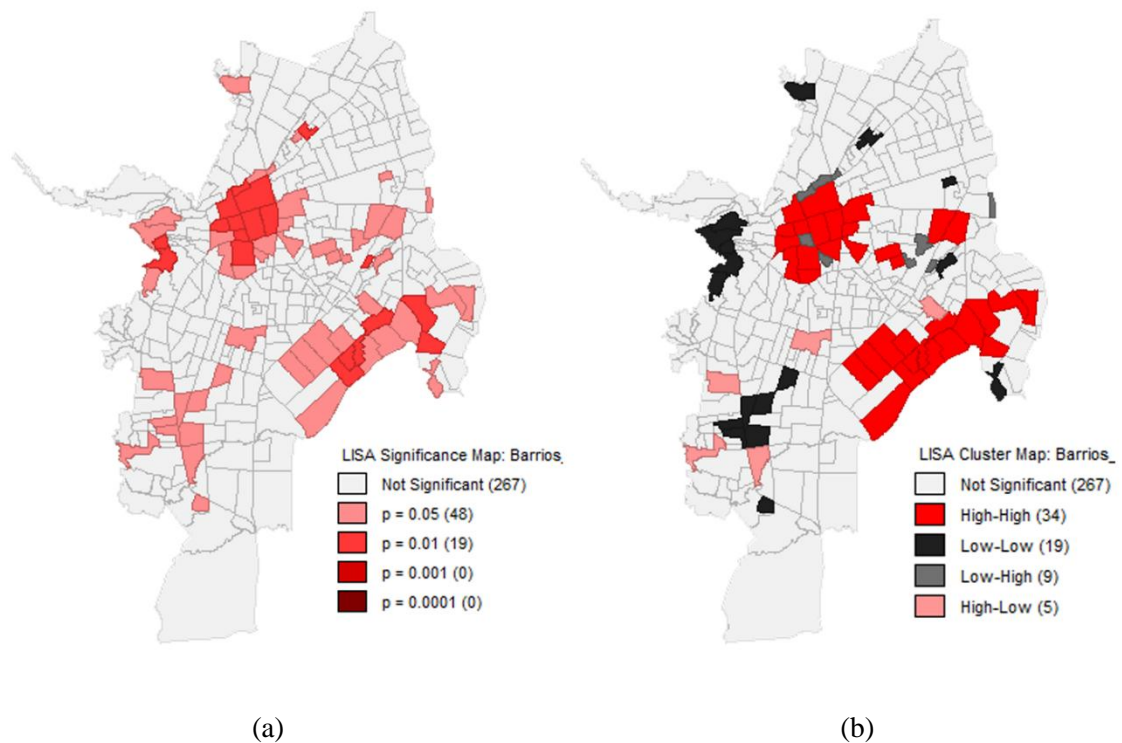


Figura 18. Mapas del método LISA para accidentes peatonales por barrio en Santiago de Cali: (a) Mapa de significancia (b) Mapa de clúster

Fuente: Elaboración propia con base en registros de accidentes peatonales CFPV

Posteriormente, se analizó la distribución espacial de los accidentes peatonales según los atributos de severidad, sexo y vehículo involucrado, con el fin de enriquecer la caracterización de los accidentes por barrio.

La severidad de los accidentes peatonales se representa espacialmente según el número de lesionados y muertos en cada barrio de Santiago de Cali. En la figura 19a se muestra que los barrios con mayor número de peatones lesionados luego de un accidente peatonal son: Sucre, Nueva floresta, Antonio Nariño, Ciudad Córdoba, Alfonso López III, Comuneros I, San Nicolás, San Juan Bosco, Guayaquil y Belalcázar. Estos barrios se ubican en las zonas centro y oriente de la ciudad con tonalidades más oscuras y con un rango de 26 a 34 casos. Por otra parte, la figura 19b muestra que los barrios con mayor número de peatones muertos luego de un accidente peatonal se ubican en la zona centro, norte y occidente de la ciudad: Obrero (17), Prados del Norte (15), Terrón Colorado (15) y Jorge Eliecer Gaitán (14).

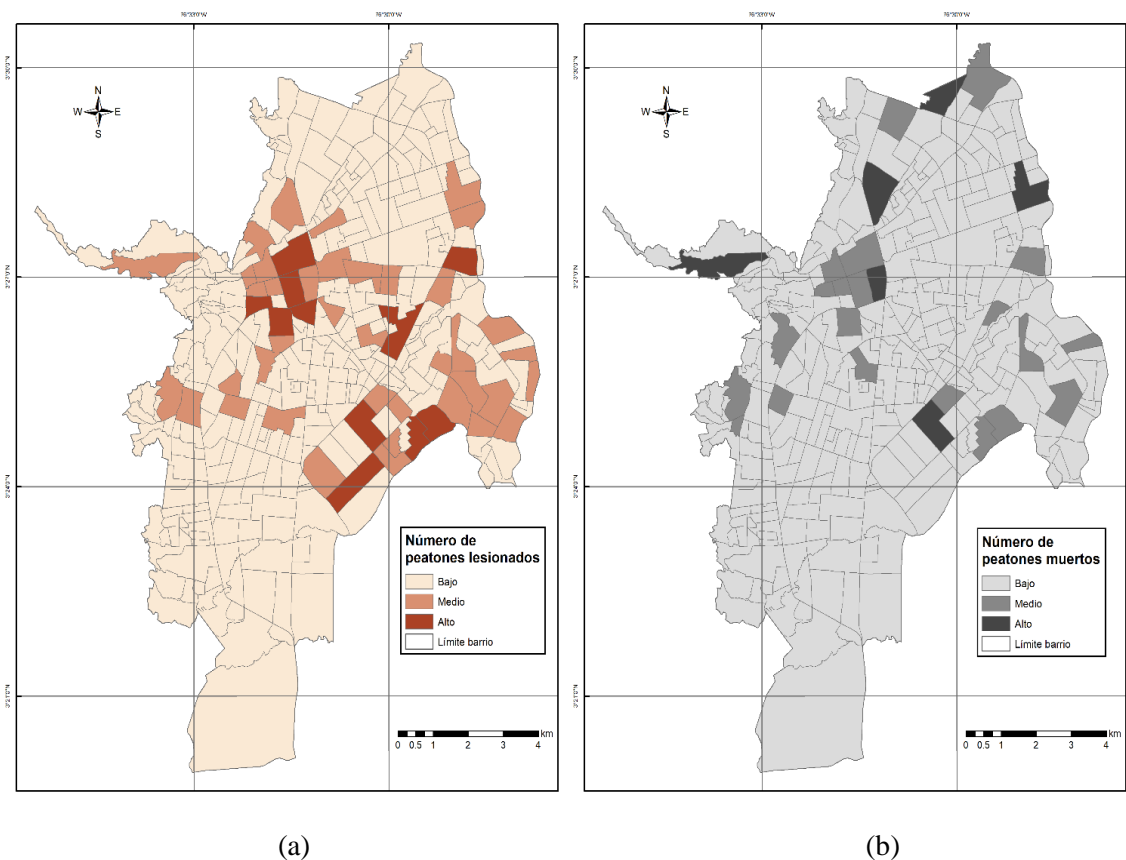


Figura 19. Mapas de accidentes peatonales según severidad: (a) Lesionados (b) Muertos
Fuente: Elaboración propia con base en registros de accidentes peatonales CFPV.

En relación con el sexo (hombres o mujeres) de los peatones involucrados en accidentes peatonales se puede decir que los barrios con mayor número de peatones hombres involucrados (figura 20a) son: Sucre (28), Antonio Nariño (24), Comuneros I (24), San Nicolás (23) y Alfonso López III (23). Estos barrios se encuentran ubicados en las zonas centro y oriente de la ciudad. Por otra parte, los barrios con mayor número de peatones mujeres involucrados en accidentes peatonales son (figura 20b):

Ciudad Córdoba (21), Guayaquil (20), San Pedro (18), Antonio Nariño (17), Nueva Floresta (16). Estos barrios se representan con tonalidades oscuras. Finalmente, se observa que los barrios que involucran peatones hombres tienen una mayor concentración en las zonas centro y oriente de la ciudad, en contraste con los barrios que involucran peatones mujeres, los cuales se distribuyen sobre diferentes de la ciudad.

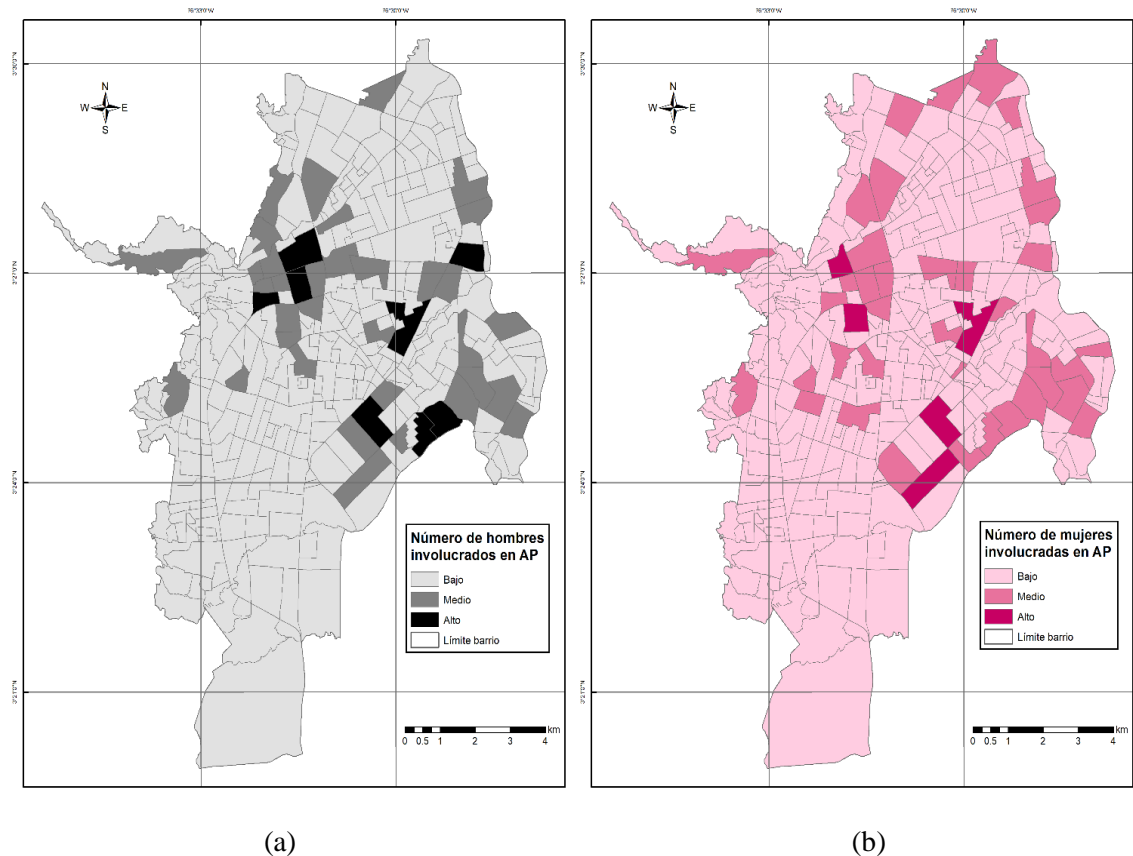
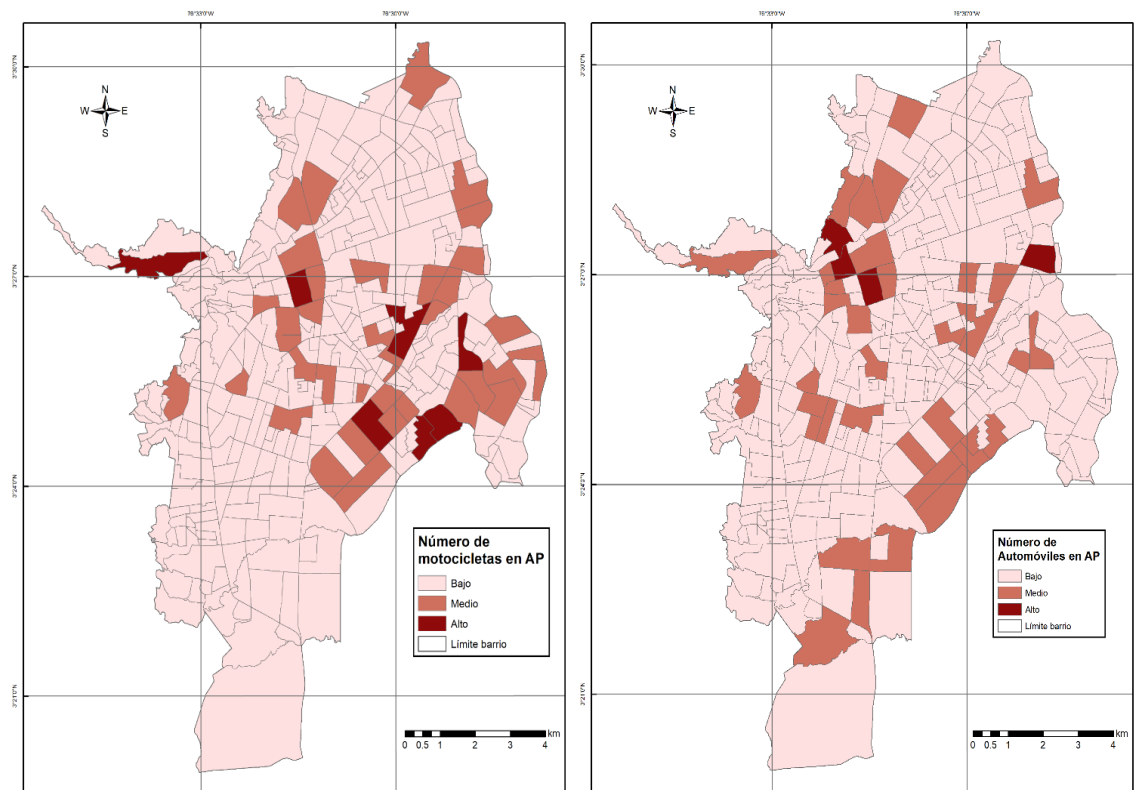


Figura 20. Mapas de accidentes peatonales según sexo del peatón: (a) Hombres (b) Mujeres
Fuente: Elaboración propia con base en registros de accidentes peatonales CFPV

Por otra parte, las motocicletas son el vehículo con mayor participación en los accidentes peatonales y se encuentran distribuidos (figura 21a) en las zona central y oriental, principalmente. Los barrios con mayor número de casos en los que se encuentran involucrados este tipo de vehículo son: Nueva Floresta (22), Sucre (19), Comuneros I (18), Terrón colorado (17) y Antonio Nariño (17). Estos barrios se encuentran representados con las tonalidades más oscuras. Por otra parte, los accidentes peatonales con automóviles involucrados (figura 21b) se distribuyen en las zonas centro, oriente y sur de la ciudad. Los barrios con mayor número de casos son: San Pedro (11), Granada (9), Alfonso Lopez III (9), Eucarístico (8) y El Guabal (8).



(a) (b)
Figura 21. Mapa de distribución espacial de los accidentes peatonales según vehículo involucrado:
 (a) motocicletas (b) automóviles.

Fuente: Elaboración propia con base en registros de accidentes peatonales CFPV

En conclusión, la caracterización de los accidentes peatonales en la ciudad de Santiago de Cali durante los años 2008-2013 muestra que la distribución espacial de los accidentes responde a una configuración espacial con autocorrelación positiva y rechaza la hipótesis nula. Por lo tanto, los barrios se encuentran agrupados en función del grado de significancia de sus relaciones de vecindad, es decir que ante la presencia de una auto-correlación espacial positiva los barrios se agrupan con otros que tengan niveles de accidentes peatonales semejantes, como es el caso de las zonas norte, sur y occidental donde la agrupación de algunos barrios presenta bajos niveles de accidentes, en contraste con la zona oriental y centro de la ciudad que poseen los niveles más altos de accidentes peatonales en Santiago de Cali. Los barrios con mayor número de casos son: Sucre, Antonio Nariño, Nueva Floresta, Alfonso López III, Los comuneros I, San Nicolás, Ciudad Córdoba, Mojica, Obrero y Guayaquil.

En el mismo sentido, se puede afirmar que los accidentes peatonales que ocurrieron entre el periodo 2008-2013 representan el 17% del total de la accidentalidad ocurrida en Santiago de Cali durante dichos años. Igualmente, la tendencia de los accidentes peatonales es decreciente. Por otra parte, al analizar la temporalidad se observa que junio es el mes de mayor ocurrencia de accidentes peatonales con el 9% (239) de los casos, contrario al mes de noviembre que presentó la menor cantidad con un 6%(158); el sábado es el día con mayor ocurrencia de accidentes peatonales con un 18%(445) y el

jueves es el día con menor cantidad con un 12%(300) del total de casos; la franja horaria con mayor ocurrencia de accidentes peatonales es la que comprende las 12:00 - 18:00 horas, ya que presenta un 33%(830) de los casos, en contraste con la franja horaria entre las 00:0 - 06:00 horas, la cual presenta la menor ocurrencia de accidentes peatonales con un 9%(233) de los casos.

Por último, la severidad de los accidentes peatonales indica que el 23% de los peatones involucrados han muerto, con una media de 97 muertes por año; el 77% representa el porcentaje de peatones lesionados con una media de 322 lesionados por año. A su vez, los peatones adultos y adultos mayores han sido los grupos de edad que mayor participación han tenido en los accidentes peatonales, además, se observó que los hombres tienen un 56% de participación en los accidentes, un valor mayor al reportado por las mujeres con un 44% de los casos. En cuanto al nivel de escolaridad de los peatones se evidenció que el nivel de básica primaria ha sido el de mayor proporción con un 36% de los casos. Finalmente, las motocicletas han sido los vehículos que más estuvieron involucrados con los accidentes peatonales, estos vehículos registraron un 44.5% del total de accidentes.

6.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL

A continuación, se presentan los rangos de clasificación (tabla 6) por cada una de las variables utilizadas en el presente estudio: patrones de red vial, facilidades de transporte, operación vial y usos del suelo, de la infraestructura vial de Santiago de Cali.

Tabla 6. Resumen rangos de clasificación por cada variable independiente

Variable	Unidades	Rangos			Clasificación
		bajo	medio	alto	
GI	decimal / barrio	0.04 - 0.43	0.43 - 0.73	0.73 - 1.19	Natural Breaks
CE	decimal / barrio	0.05 - 0.10	0.10 - 0.20	0.20 - 0.67	
NoIS	no. intersecciones / barrio	0 - 2	2 - 10	10 - 22	
NoPPM	no. puntos MIO / barrio	0 - 12	12 - 34	34 - 115	
Vel	kilómetros / hora / barrio	9.3 - 15.0	15.0 - 20.0	20.0 - 28.0	
NoLotRes	no. lotes uso residencial / barrio	0 - 45	45 - 118	118 - 287	
NoLotMix	no. lotes uso mixto / barrio	0 - 14	14 - 39	39 - 96	

La tabla 6 muestra las variables independientes seleccionadas: índice de integración global (GI), índice de centralidad entre redes (CE), intersecciones semaforizadas (NoIS), puntos de parada del sistema MIO (NoPPM), velocidad promedio (Vel), lotes con uso residencial (NoLotRes) y lotes con uso mixto (NoLotMix).

6.2.1 Patrones de red vial

Los patrones de red vial se calcularon por medio del índice de integración global (GI) y el índice de centralidad entre redes (CE) para cada uno de los 334 barrios que componen la ciudad. Además, los rangos de clasificación obtenidos son denominados como alto, medio y bajo a partir del método de

clasificación *natural breaks (Jenks)*. Sin embargo, cada uno de estos rangos representan un patrón de red vial según el índice analizado, por ejemplo, el índice de integración global con nivel alto corresponde a un patrón de tipo grilla, un nivel medio a un patrón de tipo grilla deforme y un nivel bajo a un patrón de tipo irregular. En contraste con el índice de centralidad entre redes que se clasifica de forma inversa. En la tabla 7 se detallan cada uno de los rangos obtenidos en el presente estudio.

Tabla 7. Niveles de clasificación según patrones de red vial

Nivel	índice de integración global (GI)		índice de centralidad entre redes (CE)	
	rango	patrón red vial	rango	patrón red vial
Alto	0.73 - 1.19	Grilla	0.20 - 0.67	Irregular
Medio	0.43 - 0.73	Grilla deforme	0.10 - 0.20	Grilla deforme
Bajo	0.04 - 0.43	Irregular	0.05 - 0.10	Grilla

Fuente: Elaboración propia con datos de las vías de Santiago de Cali obtenidas de la IDESC

En el caso del índice de integración global, los rangos son: alto (0.73 - 1.19), medio (0.43 - 0.73) y bajo (0.04 - 0.43). En consecuencia, se obtuvo que el 42%(139) de los barrios de la ciudad tienen un patrón de red vial tipo grilla deforme, ya que cuentan con un valor medio de GI. Así mismo, el 32%(108) de los barrios cuenta con un patrón de tipo grilla, en vista de que tienen un valor alto de GI y el 26%(87) de los barrios de la ciudad tienen un patrón de tipo irregular, ya que su valor de GI es bajo.

La distribución espacial del índice de integración global se muestra en la figura 22, la cual representa que los barrios con un valor alto de GI se ubican en la zona central de la ciudad. Estos barrios son de tipo grilla y cuentan con una mayor densidad de intersecciones y densidad vial en comparación con los barrios que poseen patrones de tipo grilla deforme e irregular (tabla 8). Este resultado es semejante a lo obtenido en otros estudios que caracterizan el patrón de tipo grilla por tener mayor número de intersecciones y densidad vial (Guo, Xu, Pei, Wong, & Yaa, 2017). Así mismo, se observa que los barrios con un valor medio de GI están localizados en algunas zonas del norte, sur y oriente de la ciudad; Estos barrios cuentan con menor densidad vial e intersecciones que el tipo grilla, pero mayor al tipo irregular. Por último, los barrios con un valor bajo de GI se ubican en la zona occidental y sur de la ciudad, principalmente en la periferia. Estos barrios tienen un patrón de red vial tipo irregular, el cual posee redes viales con menor valor en densidad de intersecciones y densidad vial, respecto a los tipos grilla y grilla deforme en Santiago de Cali.

Tabla 8. Densidad de intersecciones y densidad vial por tipo de patrón de red vial en Cali.

Patrón Vial	Número barrios	Densidad intersecciones	Densidad Vial
		media	media
Grilla	108	221.42	25.05
Grilla deforme	139	217.91	24.31
Irregular	87	139.13	18.56

Fuente: Elaboración propia con datos de las vías de Santiago de Cali obtenidas de la IDESC

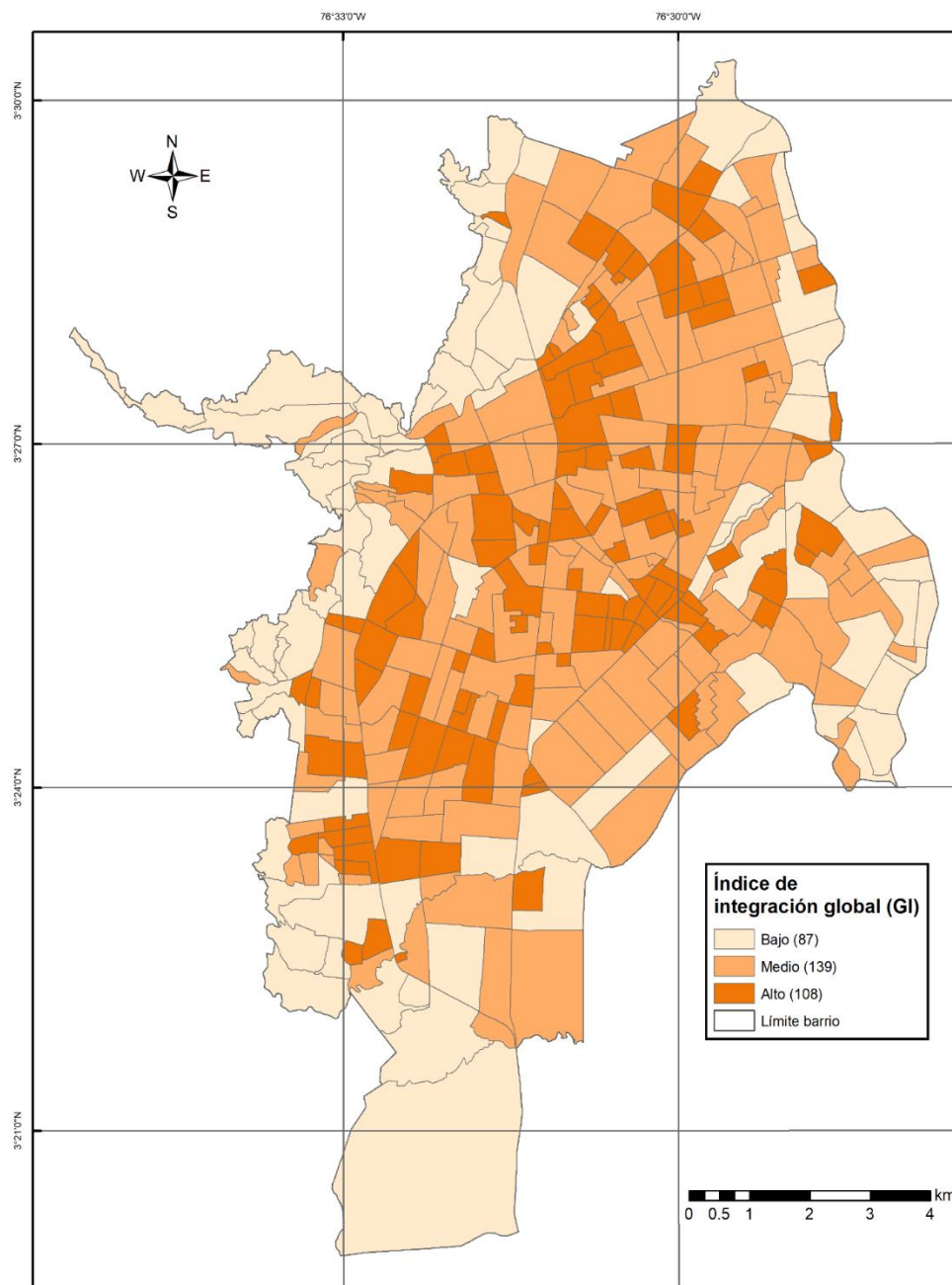


Figura 22. Distribución espacial del índice de integración global (GI) por barrio en Santiago Cali
Fuente: Elaboración propia con datos de las vías de Santiago Cali obtenidas de la IDESC

Con el fin de profundizar en el análisis de distribución espacial del índice de integración global se procede a calcular el índice de Moran, el cual obtuvo un valor de 0.3418 (figura 23). Este valor representa una autocorrelación espacial positiva entre el índice de integración global y cada barrio de la ciudad. Además, se calculó un test de significancia con 999 permutaciones que muestra un p-value de 0.001, es decir que se rechaza la hipótesis nula (la distribución espacial es aleatoria).

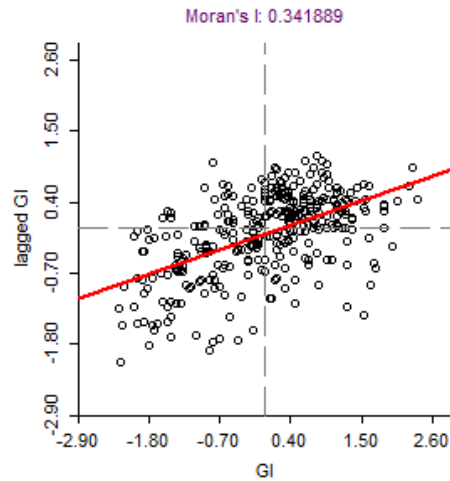


Figura 23. Moran para el índice de integración global (GI)

Fuente: Elaboración propia con datos de las vías de Santiago de Cali obtenidas de la IDESC

Posteriormente, se calculó el índice de Moran local con el fin de reconocer los clusters y su nivel de significancia en los barrios de la ciudad, obteniendo que las zonas centro y occidental tienen asociaciones con un nivel de significancia entre $p=0.001(8)$, $p=0.01(27)$ y $p=0.05(56)$, figura 24(a). Además, se observa que la zona centro tiene clústeres de barrios con valores altos (high-high) de integración global (figura 24b), confirmando que estos barrios se caracterizan por tener redes viales de tipo grilla. En contraste, la zona occidental presenta clústeres con barrios que poseen valores bajos (low-low) de integración global, es decir que dichos barrios tienen patrones de tipo irregular.

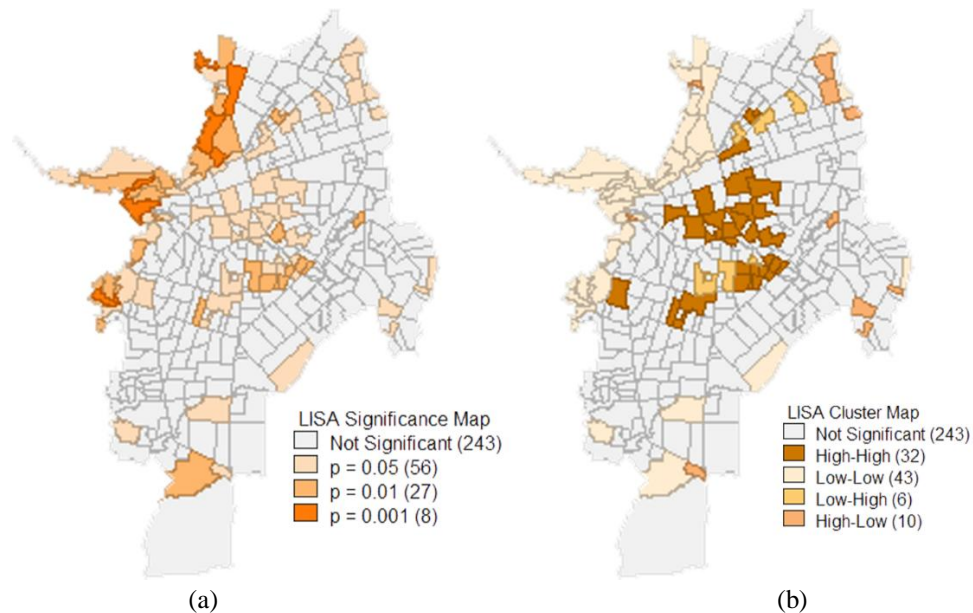


Figura 24. Mapa de significancia (a) y clusters (b) para el índice de integración global por barrio

Fuente: Elaboración propia con datos de las vías de Santiago Cali obtenidas de la IDESC

En relación con el índice de centralidad entre redes (CE) se establecieron los siguientes rangos de clasificación por medio del método *natural breaks*: alto (0.20 – 0.67), medio (0.10 – 0.20) y bajo

(0.05 - 0.10). Como resultado, el 47% (158) de los barrios de la ciudad tienen un patrón de red vial tipo grilla deforme, ya que cuentan con un valor medio de CE. También, el 27% (90) de los barrios cuenta con un patrón de tipo grilla, en vista de que tienen un valor bajo de CE y el 26% (86) de los barrios de la ciudad tienen un patrón de tipo irregular, ya que su valor de CE es alto.

Con respecto a la distribución espacial del índice de centralidad entre redes (figura 25), se observa que los barrios con un valor bajo de CE se ubican en las zonas centro y oriente de la ciudad, los cuales tienen un patrón de red vial de tipo grilla. Así mismo, se observa que los barrios con un valor medio de CE están localizados en las zonas norte y sur, los cuales tienen un patrón de red vial de tipo grilla deforme. Finalmente, los barrios con un valor alto de CE se ubican en la zona occidental, principalmente en la periferia. Estos barrios cuentan con un patrón de red vial de tipo irregular.

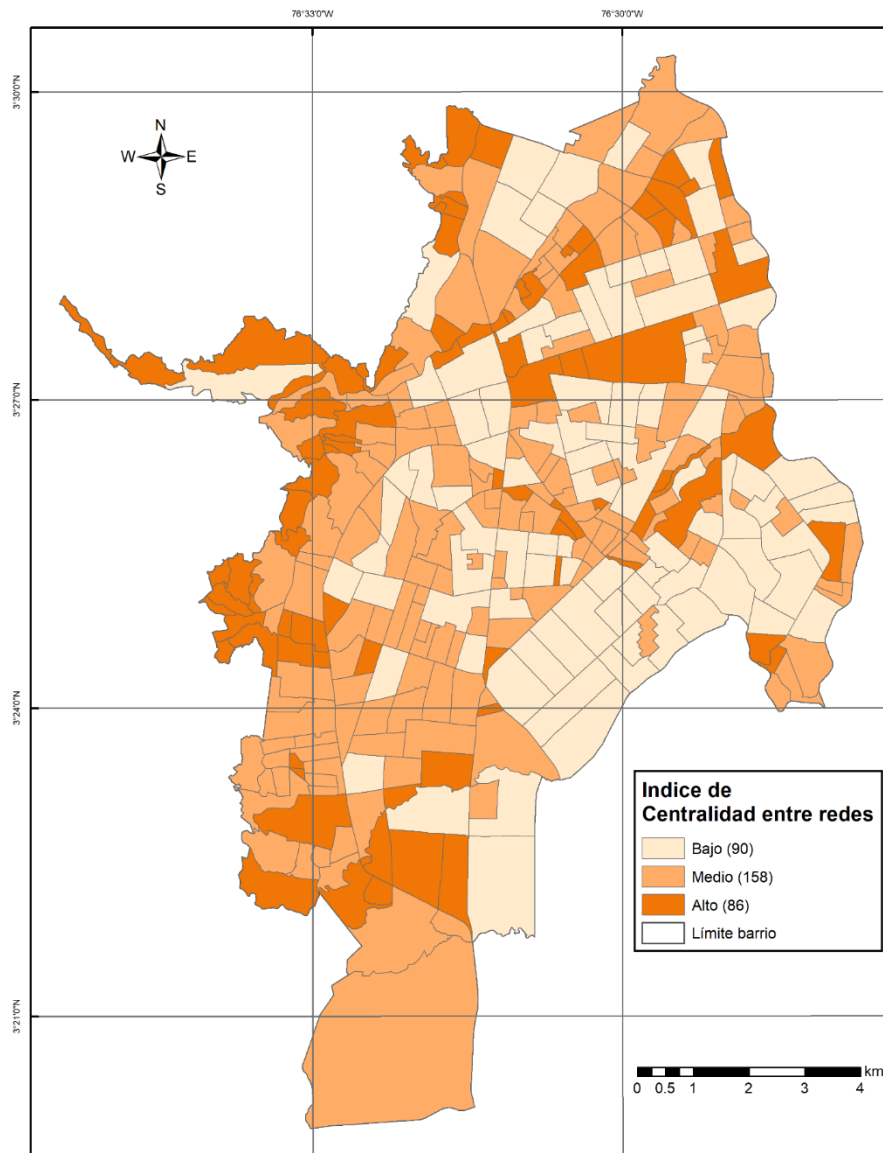


Figura 25. Distribución espacial del índice de centralidad entre redes por barrio
Fuente: Elaboración propia con datos de las vías de Santiago Cali obtenidas de la IDESC

Posteriormente, se obtuvo un índice de Moran de 0.2607 para el índice de centralidad entre redes (figura 26). Esto indica que existe una autocorrelación espacial positiva entre CE y cada barrio de la ciudad. Además, se calculó un test de significancia con 999 permutaciones que muestra un p-value de 0.001, es decir que se rechaza la hipótesis nula (la distribución espacial es aleatoria).

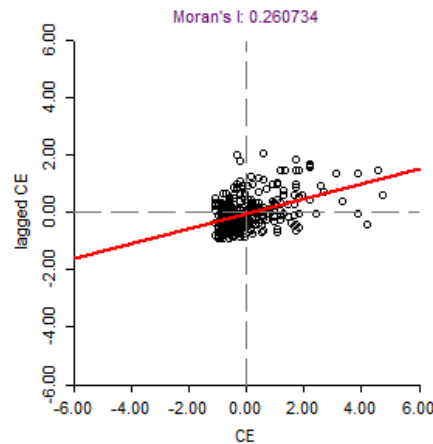


Figura 26. Moran para el índice de centralidad entre redes (CE)

Fuente: Elaboración propia con datos de las vías de Santiago de Cali obtenidas de la IDESC

Luego, se obtuvo que las zonas centro, oriental y occidental de la ciudad tienen asociaciones significativas entre $p=0.05$ (47), $p=0.01$ (20) y $p=0.001$ (8), figura 27(a). Además, se observa que la zona centro y oriental tiene clusters de barrios con valores bajos (low-low) de centralidad entre redes (figura 27b), confirmando que estos barrios se caracterizan por tener redes viales de tipo grilla. En contraste, la zona occidental presenta cluster con barrios que poseen valores altos (high-high) de centralidad entre redes, es decir que dichos barrios tienen patrones de tipo irregular.

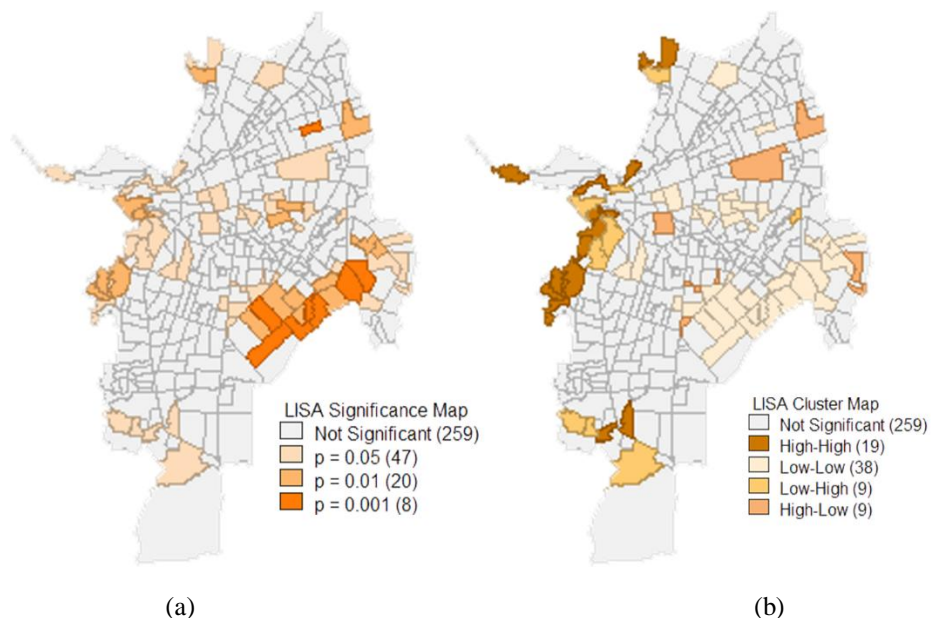


Figura 27. Mapas de significancia (a) y clúster (b) para el índice de centralidad entre redes

Fuente: Elaboración propia con datos de las vías de Santiago de Cali obtenidas de la IDESC

En conclusión, el índice de integración global y el índice de centralidad entre redes muestran que la mayor parte de los barrios de Santiago de Cali tienen un patrón de red vial de tipo grilla deforme. Pero, los barrios del centro y oriente cuentan con patrones de red vial de tipo grilla, en contraste con los barrios del occidente que tienen barrios con patrones de red vial de tipo irregular.

6.2.2 Facilidades de transporte

Las facilidades de transporte en el presente estudio se componen del número de intersecciones semaforizadas y los puntos de parada del sistema integrado de transporte masivo (MIO). Con respecto al número de intersecciones semaforizadas se observa que existen 480 puntos sobre la malla vial de la ciudad, los cuales han sido agregados a nivel de barrio. Por tanto, la figura 28 muestra la distribución espacial de las intersecciones semaforizadas a partir de los rangos generados por la clasificación *natural breaks* (Jenks) para esta variable: alto (10.00 – 22.00), medio (2.00 – 10.00) y bajo (0.00 - 2.00).

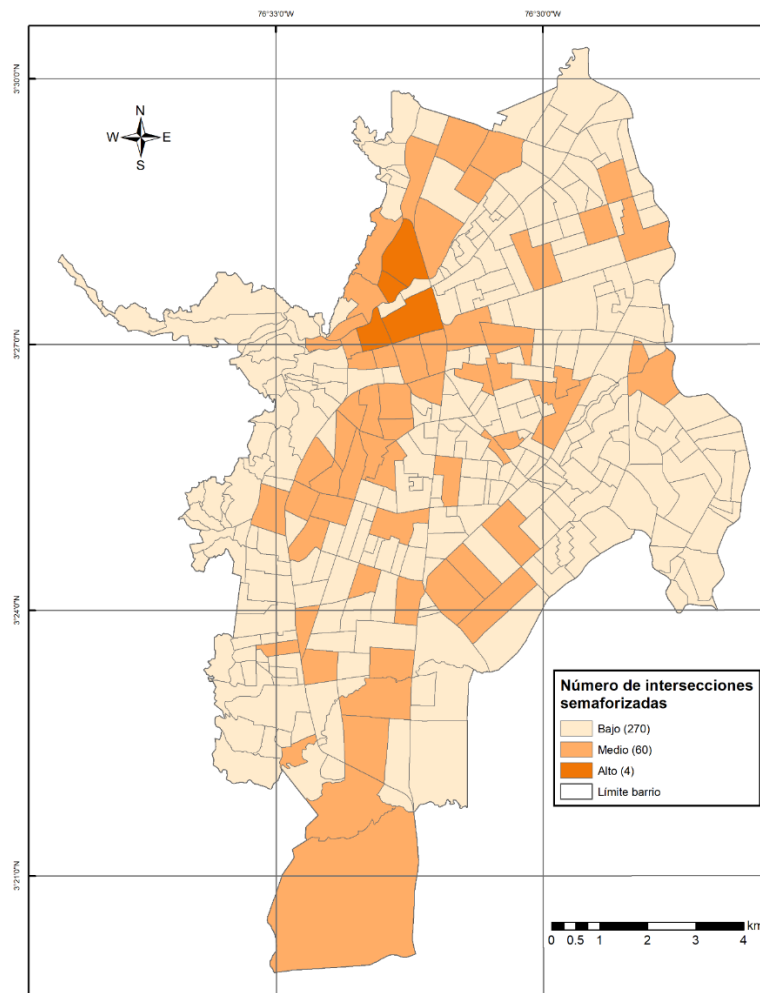


Figura 28. Mapa de distribución espacial del número de intersecciones semaforizadas por barrio
Fuente: Elaboración propia con datos de intersecciones obtenidas de la IDESC

Como resultado se obtuvo que el 2%(4) de los barrios tienen un número alto de intersecciones semaforizadas, los cuales se ubican principalmente en la zona centro de la ciudad. Así mismo, el 18%(60) de los barrios cuentan con nivel medio de intersecciones semaforizadas y se encuentran ubicados en algunas zonas del norte, centro y sur. Finalmente, los barrios con nivel bajo de intersecciones semaforizadas representan el 80% (270) del total de barrios. Esto se debe a que el 47% (157) de los barrios en la ciudad no cuentan con intersecciones semaforizadas según los datos obtenidos por el IDESC (Infraestructura de Datos Espaciales de Santiago de Cali).

En la distribución espacial de las intersecciones semaforizadas se muestra una mayor concentración en la zona centro, principalmente en barrios como San Pedro, Versalles, Centenario, Santa Rosa y El Calvario. Esto se confirma mediante el índice de Moran, el cual obtuvo un valor de 0.3706 (figura 29), es decir que existe una autocorrelación espacial positiva entre el número de intersecciones semaforizadas y cada barrio de la ciudad. Además, se calculó un test de significancia con 999 permutaciones que muestra un p-value de 0.003, es decir que se rechaza la hipótesis nula (la distribución espacial es aleatoria).

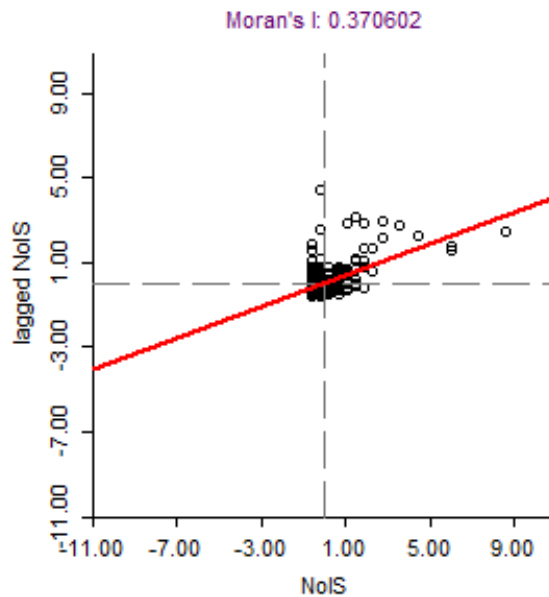


Figura 29. Moran para el número de intersecciones semaforizadas (NoIS)
Fuente: Elaboración propia con datos de intersecciones obtenidas de la IDESC

Posteriormente, se calculó el índice de Moran local con el fin de reconocer los clústeres y su nivel de significancia en los barrios de la ciudad, obteniendo que las zonas centro, norte y occidental tienen asociaciones con un nivel de significancia entre $p=0.001$ (9), $p=0.01$ (8) y $p=0.05$ (25), figura 30(a). Además, se observa que la zona centro tiene clústeres de barrios (18) con valores altos (high-high) en número de intersecciones semaforizadas (figura 30b). En contraste, la zona occidental presenta clústeres con barrios que poseen valores bajos (low-low), es decir que dichos barrios cuentan con pocas intersecciones semaforizadas.

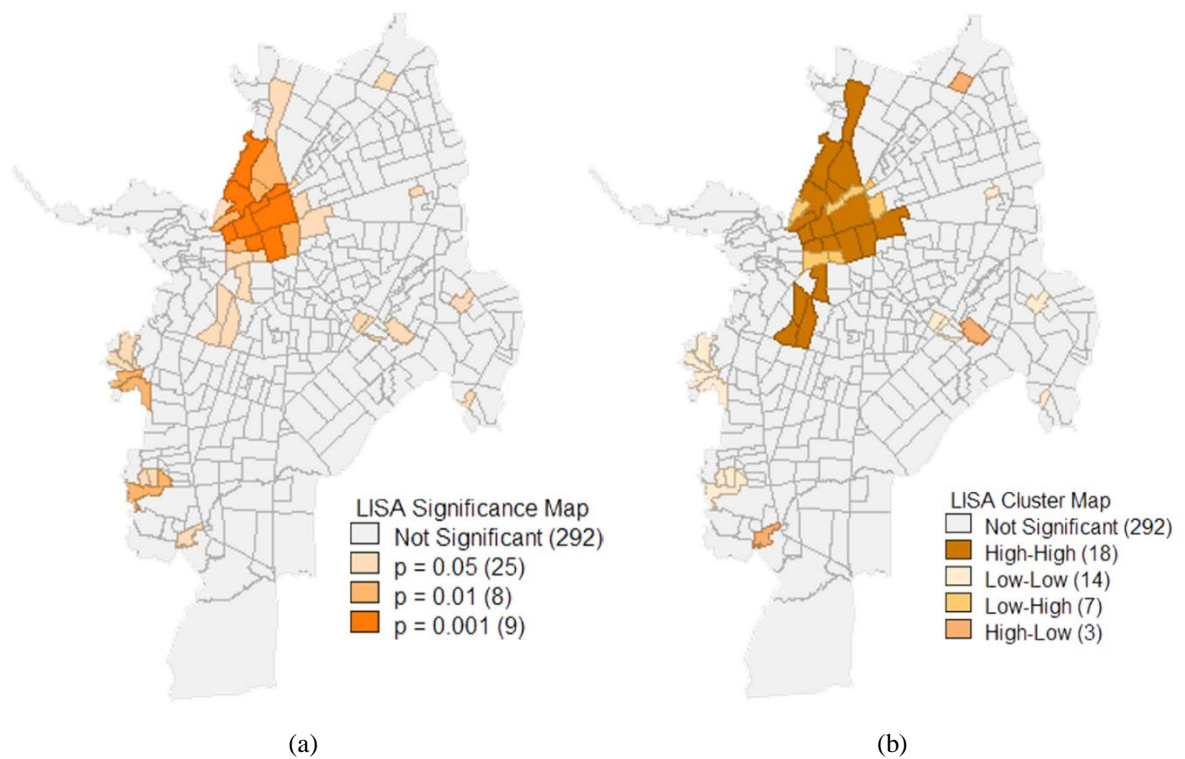


Figura 30. Mapa de significancia (a) y clústeres (b) para el número de intersecciones semaforizadas por barrio

Fuente: Elaboración propia con datos de intersecciones obtenidas de la IDESC

En cuanto a los puntos de parada del sistema MIO se reconocen cerca de 3,743 puntos que brindan el acceso al transporte masivo. Estos puntos se representan en la figura 31, la cual muestra la distribución espacial del número de puntos de parada MIO por barrio en toda la ciudad. Además, se muestran los rangos de clasificación a partir de *natural breaks* (Jenks): alto (34 – 115), medio (12 – 34) y bajo (0 – 12). En consecuencia, se observa que los barrios con valores altos en puntos de parada MIO representan el 5%(17), en contraste con los barrios que tienen niveles bajos que representan el 67%(224) y los barrios que cuentan con nivel medio representan un 28%(93) del total.

Los barrios como Villa del Sol, San Joaquín, La Gran Colombia, Unidad Residencial Santiago de Cali y Versales representan los barrios con mayor número de puntos de parada MIO. Además, se observa por medio del índice de Moran, el cual obtuvo un valor de 0.2572 (figura 32), es decir que existe una autocorrelación espacial positiva entre el número de puntos de parada MIO y cada barrio de la ciudad. También, se calculó un test de significancia con 999 permutaciones que muestra un p-value de 0.001, es decir que se rechaza la hipótesis nula (la distribución espacial es aleatoria).

Por otra parte, se calculó el índice de Moran local con el fin de reconocer los clústeres y su nivel de significancia en los barrios de la ciudad, obteniendo que las zonas oriental y sur tienen asociaciones con un nivel de significancia entre $p=0.001$ (5), $p=0.01$ (11) y $p=0.05$ (61), figura 33(a). Además, se observa que la zona oriental tiene clústeres de barrios con valores altos (high-high) en número de puntos de parada MIO (figura 33b). Por el contrario, algunas zonas del centro y el occidente de la ciudad presentan clústeres con barrios que poseen valores bajos (low-low) en el número de puntos de parada del sistema MIO.

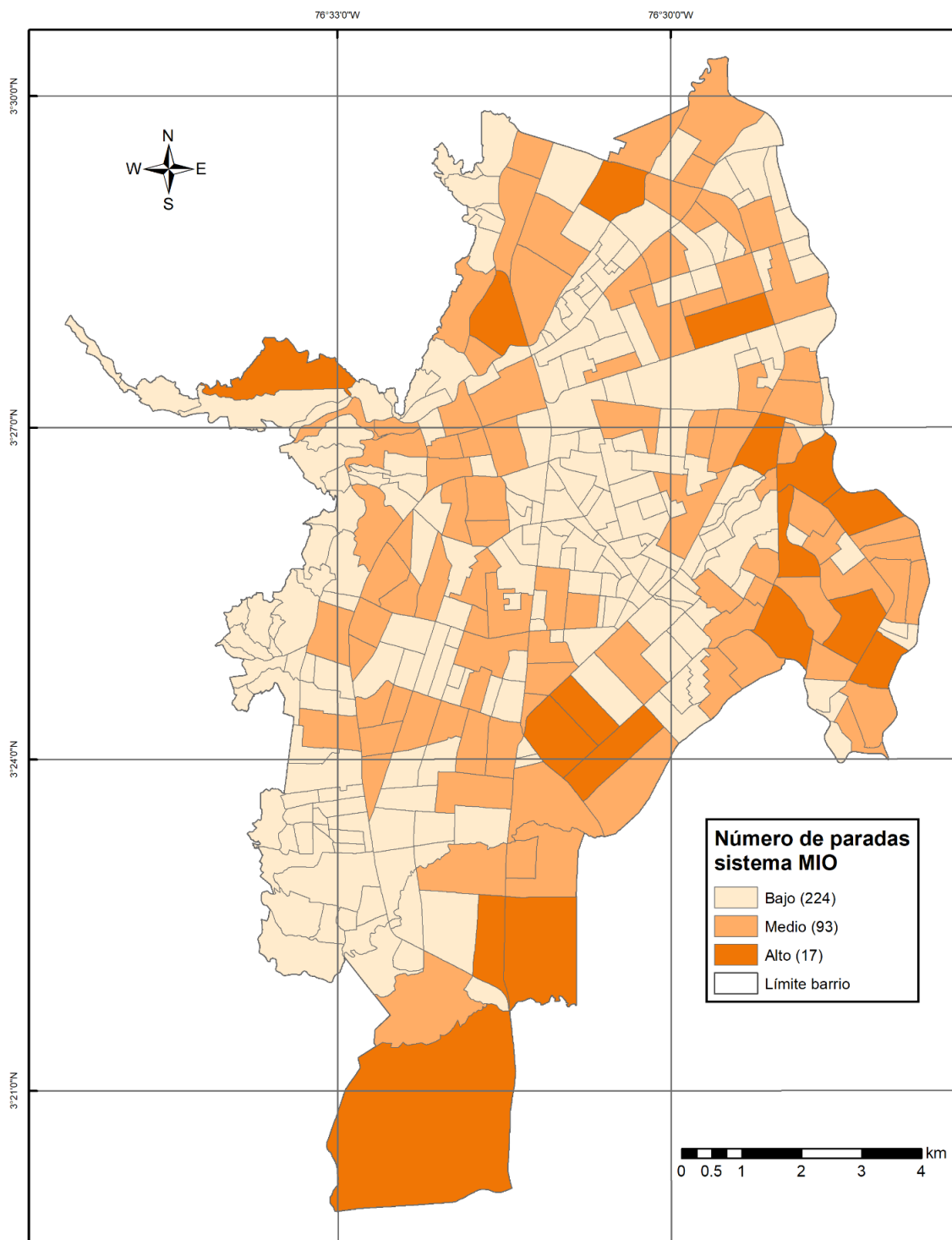


Figura 31. Mapa de distribución espacial del número de puntos de parada del sistema MIO por barrio.

Fuente: Elaboración propia con datos de puntos MIO obtenidos de la IDESC

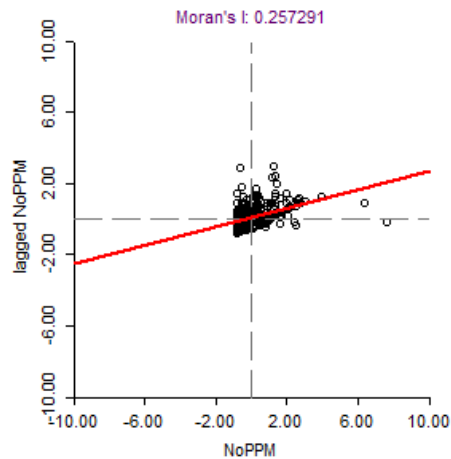


Figura 32. Moran para el número de paradas del sistema MIO (NoPPM)
Fuente: Elaboración propia con datos de puntos MIO obtenidos de la IDESC

En conclusión, las facilidades de transporte muestran que el mayor número de intersecciones semaforizadas se encuentran en el centro de la ciudad, posiblemente, una de las zonas con mayor regulación de tráfico debido al nivel de interacción entre actores viales, como es el caso de los peatones. A su vez, la zona oriente y sur de la ciudad cuentan con una buena cobertura en puntos de acceso al sistema de transporte masivo MIO, lo que se traduce en mayor oferta para los peatones que se desplazan hasta dichos puntos.

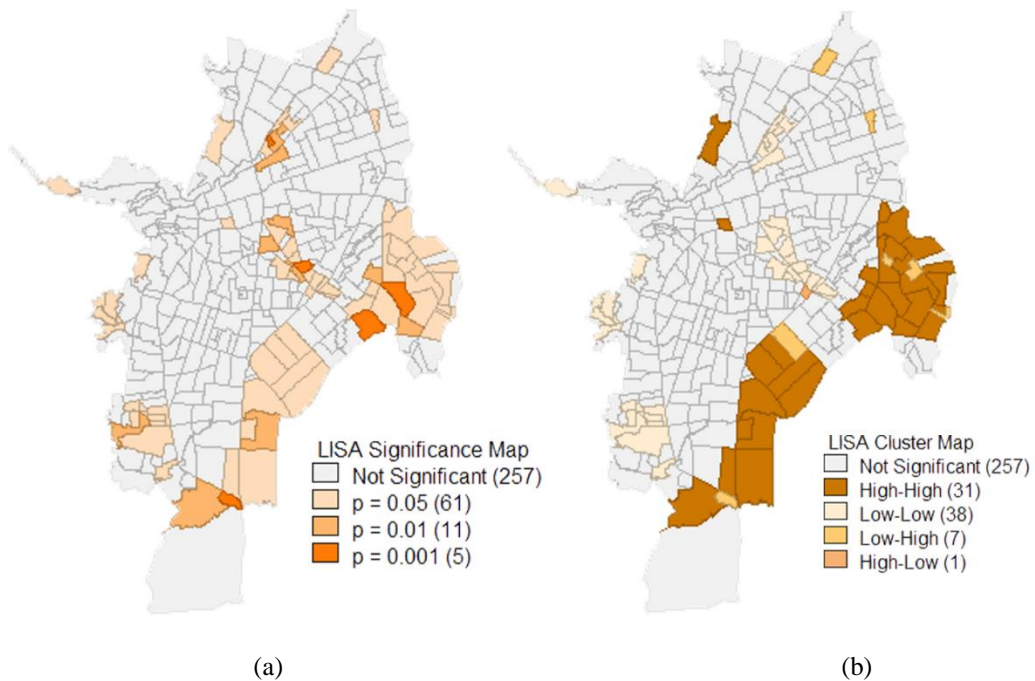


Figura 33. Mapa de significancia (a) y clústeres (b) para el número de puntos de parada del sistema MIO por barrio

Fuente: Elaboración propia con datos de puntos MIO obtenidos de la IDESC

6.2.3 Operación vial

El factor de operación vial se refiere a la velocidad promedio de circulación en cada uno de los barrios que componen Santiago de Cali. Como resultado, el valor mínimo a nivel global en la ciudad es de 9 km/h y el máximo de 28 km/h, lo que indica que están dentro de los límites de velocidad (figura 34). Además, se identificó que el valor promedio de la velocidad a nivel de barrio es de 16 km/h, aunque se debe tener en cuenta que estos son valores promedio que no discriminan entre vías primarias, secundarias, colectoras o locales (promedio simple).

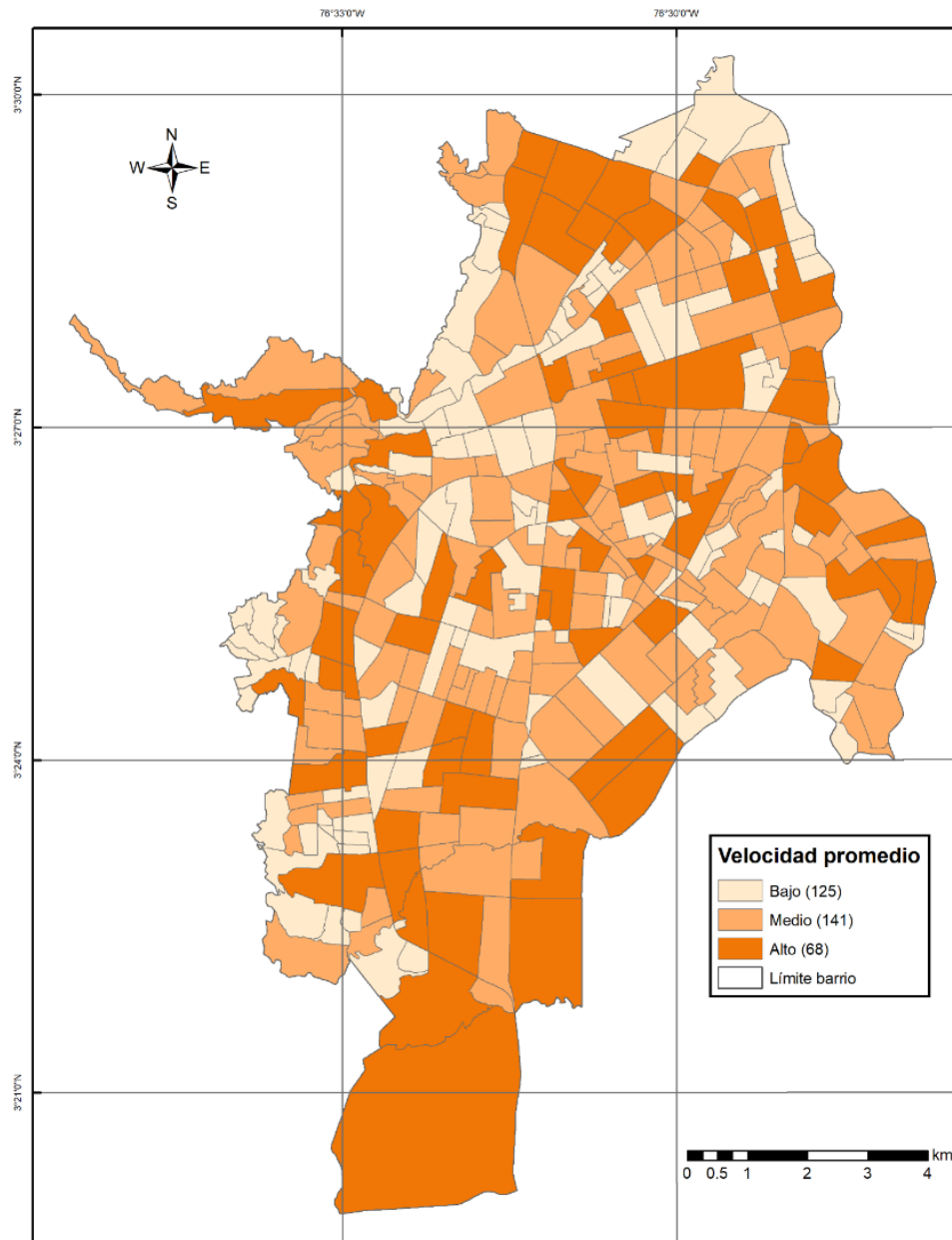


Figura 34. Mapa de distribución espacial de la velocidad promedio por barrio. Fuente: Elaboración propia con datos de Google Maps

Por otra parte, se definen tres rangos para las velocidades promedio a partir de la clasificación *natural breaks (Jenks)*, los rangos son: alto (20.0 – 28.0), medio (15.0 – 20.0) y bajo (9.3 – 15.0). Por tanto, los barrios con rango alto de velocidades representan el 20%(68) del total de barrios en la ciudad, seguido de los barrios con rangos de velocidad medio que tienen el 42%(141) y los barrios con bajas velocidades promedio representan el 38%(125). Estas cifras muestran que el mayor porcentaje de los barrios cuentan con valores medios de velocidad en sus redes viales.

En cuanto a la distribución espacial de las velocidades promedio se observa que no existen concentraciones de barrios con altos valores de velocidad, diferente a los barrios con valores medios que sí se concentran en las zonas norte, oriente y sur. También, se observa que dichas concentraciones se generan en los barrios cercanos a las vías primarias (carrera 1, calle 70 y calle 25).

Los barrios como Área en desarrollo-Parque del amor (28.0 km/h), Parcelaciones Pance (26.7 km/h), Galindo (24.9 km/h) y el Troncal (24.4 km/h) son los barrios que mayores velocidades promedio presentan en toda la ciudad. Por otra parte, se obtuvo un índice de Moran de 0.1135 (figura 35), es decir que existe una autocorrelación espacial positiva entre el número de puntos de parada MIO y cada barrio de la ciudad. También, se calculó un test de significancia con 999 permutaciones que muestra un p-value de 0.001, es decir que se rechaza la hipótesis nula (la distribución espacial es aleatoria).

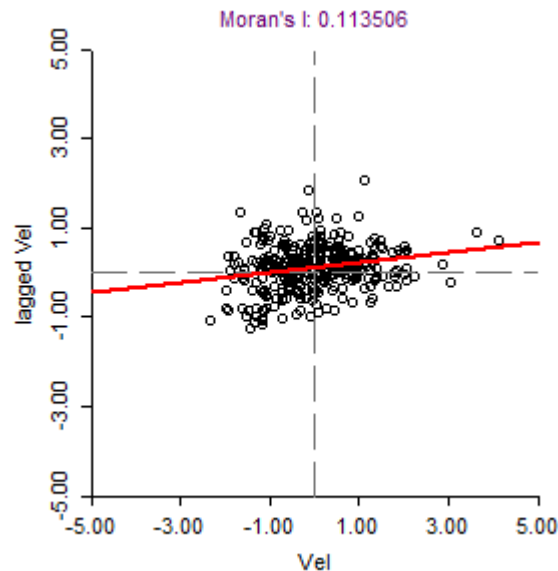


Figura 35. Moran de la velocidad promedio (Vel) en cada barrio

Fuente: Elaboración propia con datos de Google Maps

Posteriormente, se calculó el índice de Moran local obteniendo que algunos barrios de las zonas centro y sur tienen asociaciones con un nivel de significancia entre $p=0.001$ (4), $p=0.01$ (14) y $p=0.05$ (33), figura 36(a). Además, se observa que la zona sur tiene clústeres de barrios con valores altos (high-high) de velocidad promedio (figura 36b). No obstante, el centro de la ciudad presenta clústeres con barrios que poseen valores bajos (low-low) en la velocidad promedio.

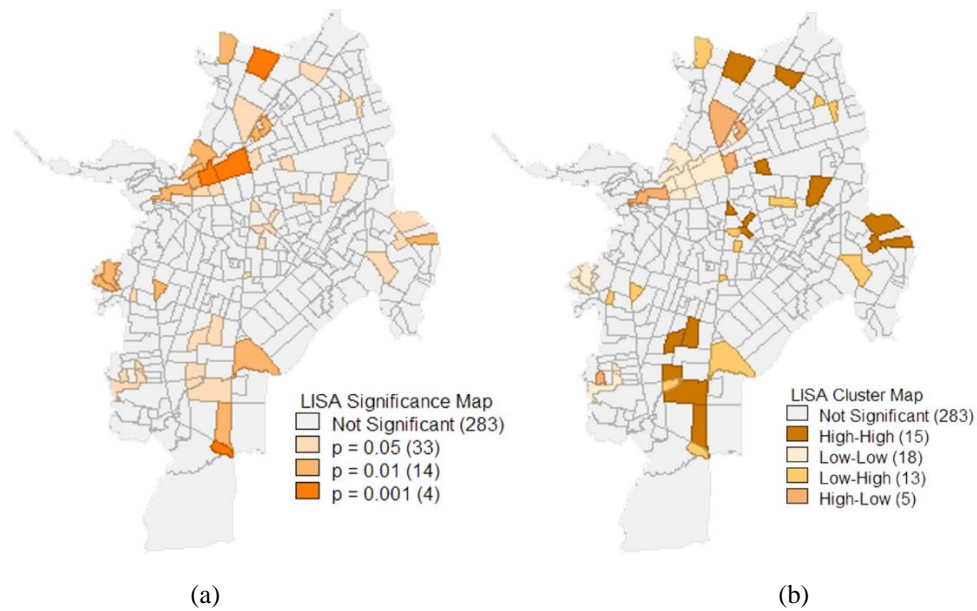


Figura 36. Mapa de significancia (a) y clusters (b) para la velocidad promedio por barrio
Fuente: Elaboración propia con datos de Google Maps

Por último, se debe aclarar que variables de operación vial como el tránsito promedio diario no se tiene en cuenta en el presente estudio, ya que los datos disponibles en la IDESC (Infraestructura de datos espaciales de Santiago de Cali) realizados para el PIMU 2015 (Plan Integrado de Movilidad Urbana) solo consideran los tipos de vías principales y secundarias de la ciudad. Además, se observó que el 16% (54) del total de barrios no tienen vías principales y secundarias o no cuentan con datos de tránsito promedio diario para este tipo de vías. En consecuencia, los datos de tránsito promedio diario a nivel de barrio no son representativos.

6.2.4 Usos del suelo urbano

Los usos del suelo urbano utilizados en el presente estudio son el uso residencial y el uso mixto. Estos usos han sido seleccionados ya que son utilizados en la literatura relacionada con la seguridad vial de los peatones (Marshall & Garrick, 2011; Lam, Yao, & Loo, 2014; Guo, Xu, Pei, Wong, & Yao, 2017). Además, se observó que los usos de suelo residencial y mixto son los que cuentan con mayor número de lotes en Santiago de Cali (tabla 9), por tanto, se decide analizar estos dos únicos tipos de uso.

Tabla 9. Número de lotes por tipo de uso de suelo en Santiago de Cali

Uso de suelo	Número de lotes	%
Residencial	14,073	69.5
Mixto	4,150	20.5
Espacio Público	1,422	7.0
Equipamientos	409	2.0
Industrial	161	0.8
Área de expansión	27	0.2

Fuente: Elaboración propia con datos de áreas de actividad de Cali obtenidas del IDESC

Con el fin de analizar únicamente el uso residencial se definieron rangos por medio de la clasificación *natural breaks (Jenks)*, dichos rangos son: alto (118 - 287), medio (45 - 118) y bajo (0 - 45). Estos rangos muestran que el 6%(21) de los barrios tienen un número alto de lotes con uso residencial, seguido de un 26%(86) que corresponde a barrios con un número medio de lotes residenciales y el 68%(227) del total de barrios de la ciudad cuenta con un número bajo de lotes de uso residencial. En la figura 37 se observa que la mayoría de los barrios cuenta con un número bajo de lotes residenciales, exceptuando las zonas oriente y norte que presentan concentraciones de barrios con valores altos y medios.

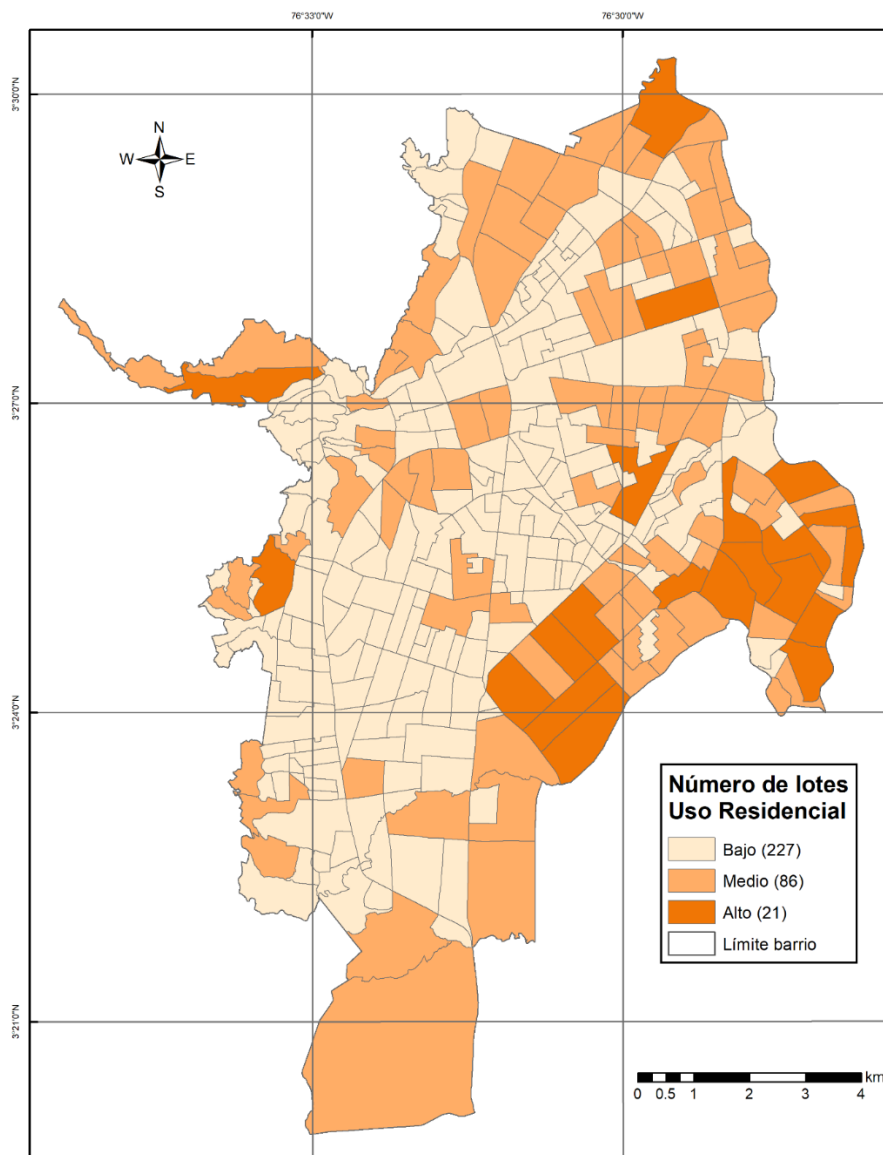


Figura 37. Mapa de distribución espacial del número de lotes de uso residencial por barrio
Fuente: Elaboración propia con datos de áreas de actividad de Santiago de Cali obtenidas de la IDESC

Los barrios con mayor número de lotes de uso residencial son: Ciudadela Floralia (287), El Morichal (258), Manuela Beltrán (187), Promociones Populares (185) y Ciudad Córdoba (181). A su vez, se

obtuvo un índice de Moran de 0.3201 (figura 38), es decir que existe una autocorrelación espacial positiva entre el número de lotes con uso residencial y cada barrio de la ciudad. También, se calculó un test de significancia con 999 permutaciones que muestra un p-value de 0.001, es decir que se rechaza la hipótesis nula (la distribución espacial es aleatoria).

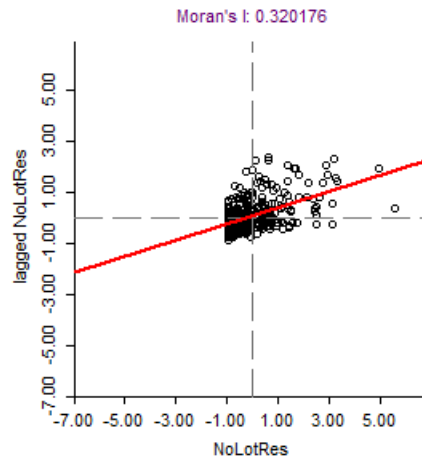


Figura 38. Moran para el número de lotes con uso residencial (NoLotRes)
Fuente: Elaboración propia con datos de áreas de actividad de Cali obtenidas del IDESC

Posteriormente, se calculó el índice de Moran local con el fin de reconocer los clústeres y su nivel de significancia en los barrios de la ciudad, obteniendo que las zonas centro, oriente y sur tienen asociaciones con un nivel de significancia entre $p=0.001$ (10), $p=0.01$ (16) y $p=0.05$ (43), figura 39(a). Así mismo, se observa que la zona oriental y norte tienen clústeres de barrios con mayor número (high-high) de lotes residenciales (figura 39b). En contraste, algunos barrios de las zonas centro y sur presentan agrupaciones con valores bajos (low-low) en el número de lotes con uso residencial.

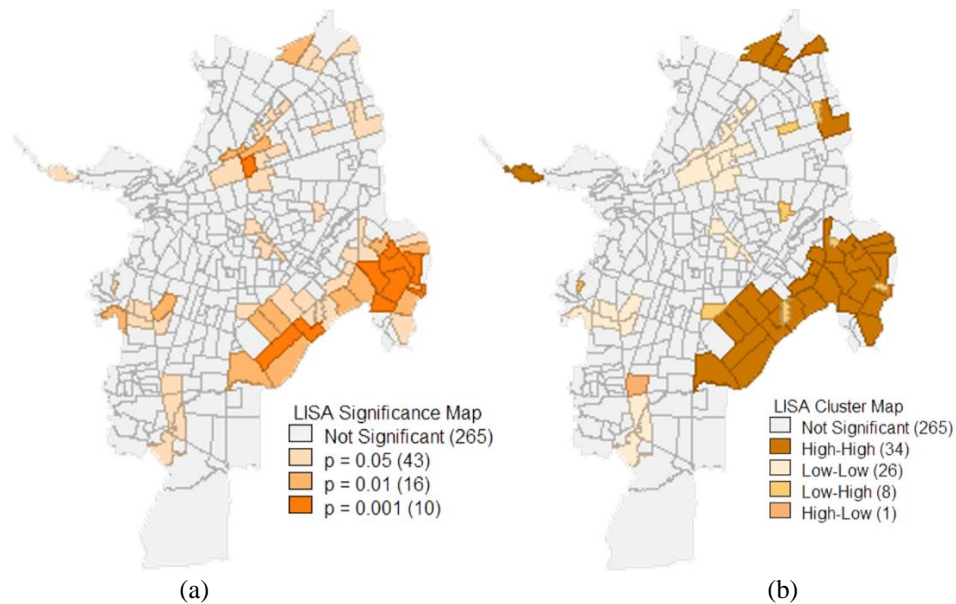


Figura 39. Mapa de significancia (a) y clusters (b) para el número de lotes con uso residencial
Fuente: Elaboración propia con datos de áreas de actividad de Cali obtenidas del IDESC

En relación con el uso de suelo mixto se representó únicamente su distribución espacial en la figura 40 a partir de la clasificación *natural breaks (Jenks)* en tres rangos: alto (39 - 96), medio (14 - 39) y bajo (0 - 14). Como resultado, se obtuvo que los barrios con número alto de lotes de uso de suelo mixto representan el 4% (13) del total de los barrios de la ciudad, así mismo, el 27% (91) corresponde a barrios con número medio y un 69% (230) corresponde a barrios con un número bajo de lotes con uso de suelo mixto.

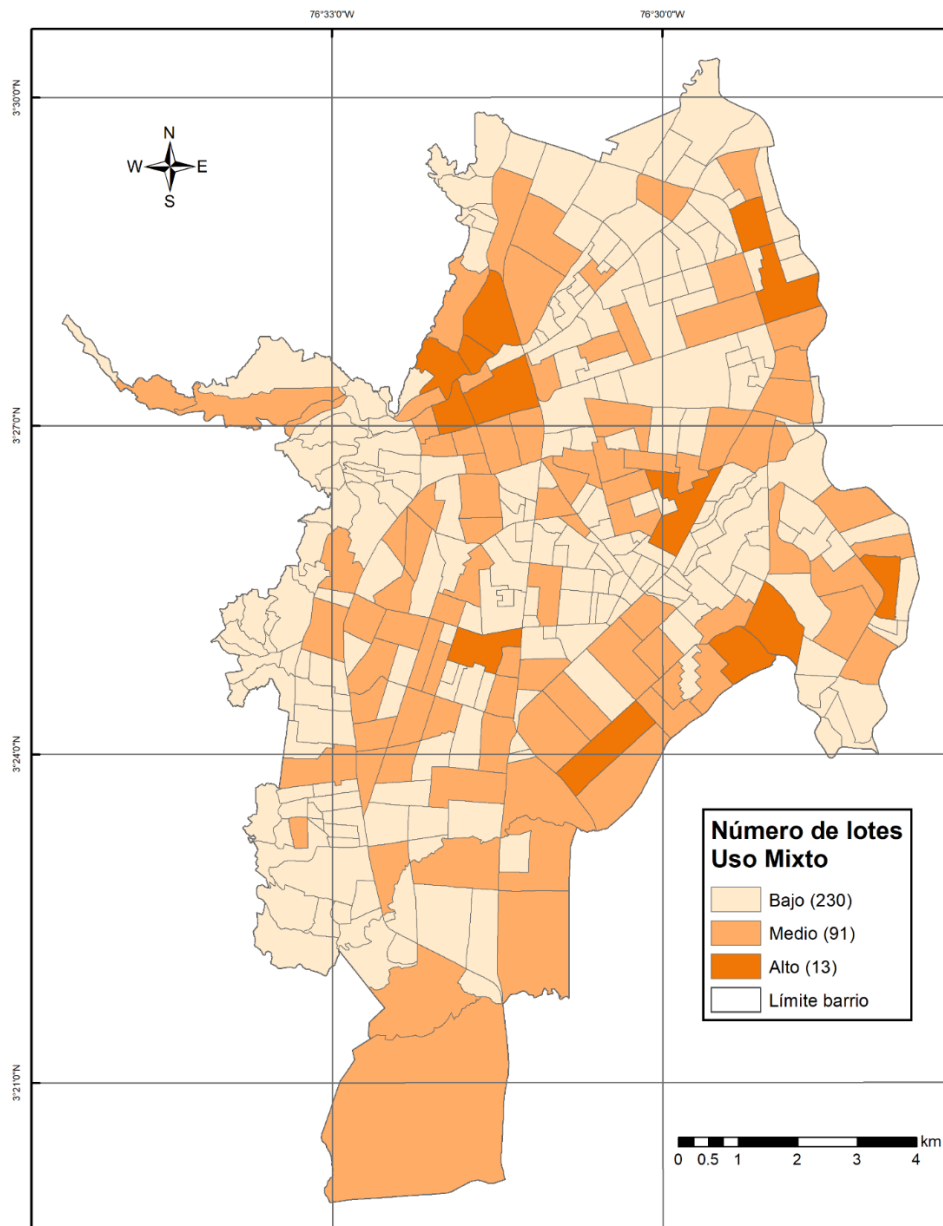


Figura 40. Mapa de distribución espacial del número de lotes de uso mixto por barrio

Fuente: Elaboración propia con datos de áreas de actividad de Santiago de Cali obtenidas de la IDESC

Los barrios como Ciudad Córdoba (96), Granada (93), San Nicolás (79), San Vicente (74) y Versalles (62) son los barrios con mayor número de lotes de uso mixto en Santiago de Cali. Por otra parte, se

obtuvo un índice de Moran de 0.2715 (figura 41), es decir que existe una autocorrelación espacial positiva entre el número de lotes con uso residencial y cada barrio de la ciudad. También, se calculó un test de significancia con 999 permutaciones que muestra un p-value de 0.001, es decir que se rechaza la hipótesis nula (la distribución espacial es aleatoria).

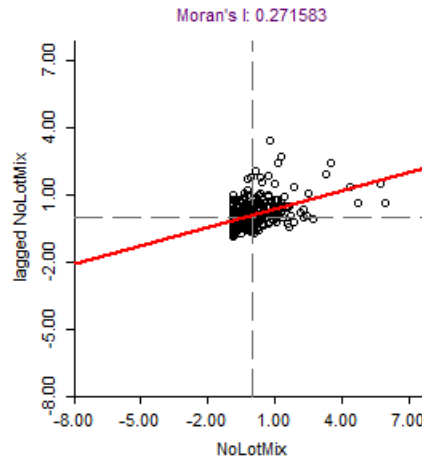


Figura 41. Moran para el número de lotes con uso mixto (NoLotMix)

Fuente: Elaboración propia con datos de áreas de actividad de Cali obtenidas del IDESC

Posteriormente, se calculó el índice de Moran local con el fin de reconocer los clusters y su nivel de significancia en los barrios de la ciudad, obteniendo que las zonas centro, oriente y sur tienen asociaciones con un nivel de significancia entre $p=0.001$ (10), $p=0.01$ (15) y $p=0.05$ (27), figura 42(a). A su vez, se observa que la zona oriental y centro tienen clústeres de barrios con niveles altos (high-high) en el número de lotes con uso mixto (figura 42b). Por el contrario, algunos barrios de las zonas sur y occidente presentan clústeres con niveles bajos (low-low) en el número de lotes con uso mixto.

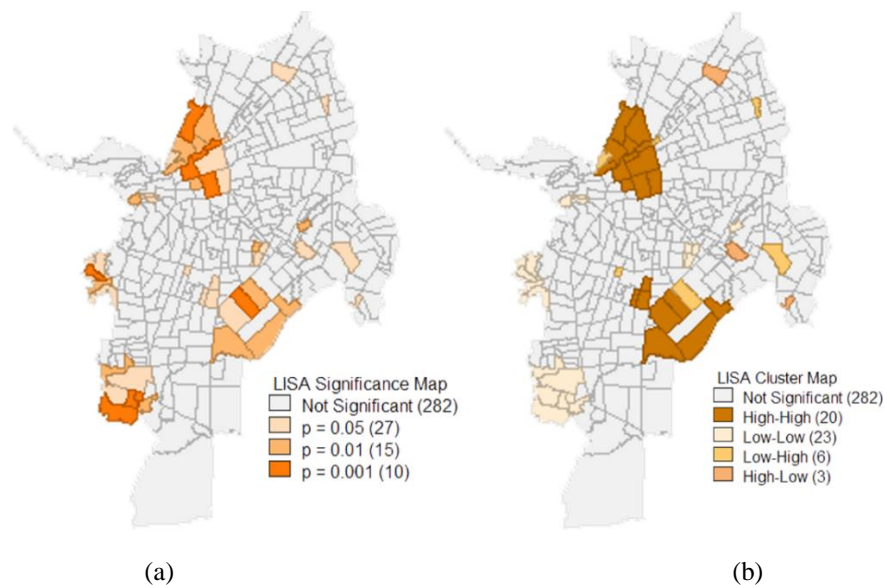


Figura 42. Mapa de significancia (a) y clústeres (b) para el número de lotes con uso mixto
Fuente: Elaboración propia con datos de áreas de actividad de Santiago de Cali obtenidas de la IDESC

En la figura 43, se muestra el uso de suelo predominante por cada barrio de la ciudad. Sin embargo, se debe tener en cuenta que se comparan únicamente los usos de suelo residencial y mixto, dejando por fuera otros usos como el industrial, espacio público o equipamientos. De esta forma, se observa que el uso de suelo mixto es predominante en el 13% (43) de los barrios de la ciudad, es decir que el número de lotes con uso de suelo mixto es mayor al número de lotes con uso de suelo residencial en dichos barrios. También, se observa que los barrios con uso mixto predominante se concentran principalmente en la zona centro y sur de la ciudad, por lo que se podría inferir que dichas zonas generan un nivel de actividad considerable en relación con los peatones. Por otra parte, el uso de suelo residencial es predominante en el 87% (291) de los barrios, es decir que la mayoría de los barrios de la ciudad cuenta con este tipo de uso.

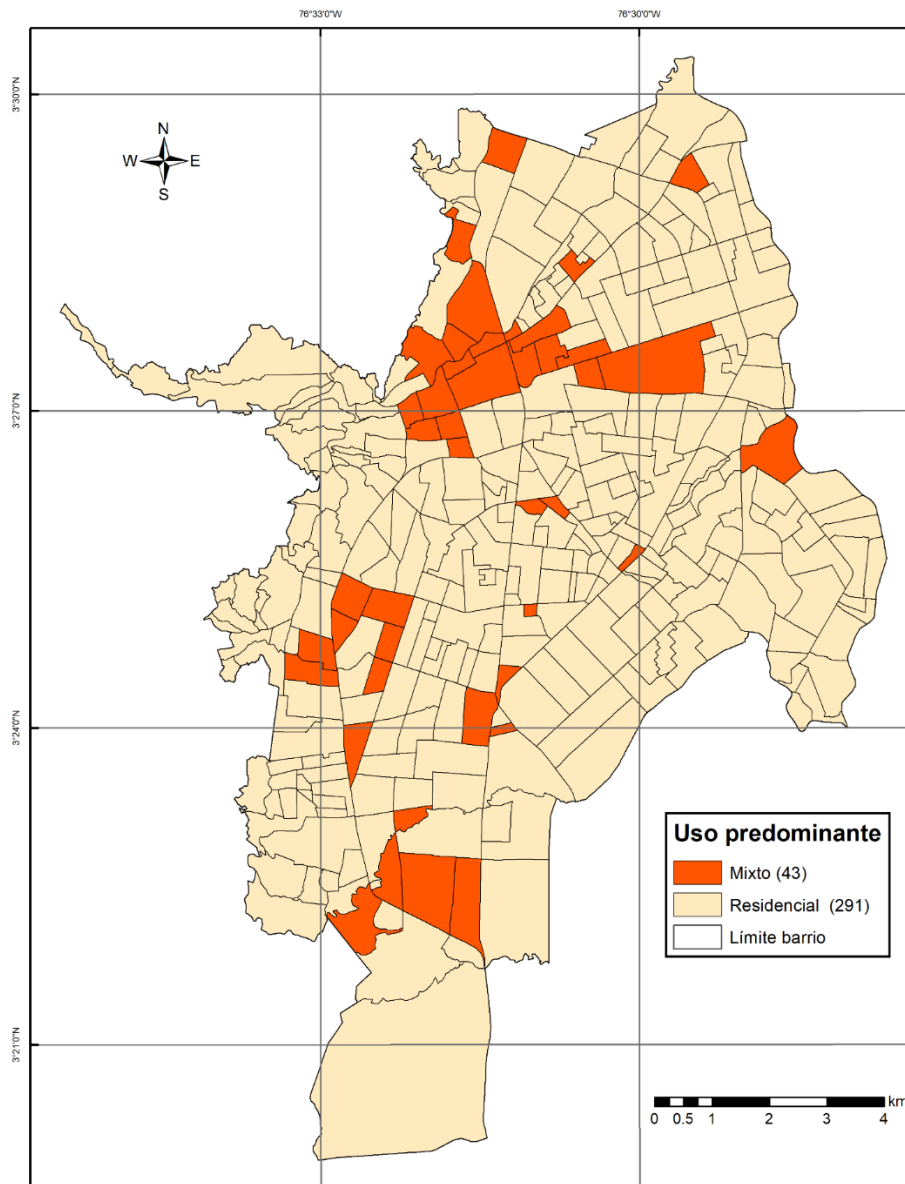


Figura 43. Mapa de uso predominante (residencial o mixto) por barrio
Fuente: Elaboración propia con datos de áreas de actividad de Santiago de Cali obtenidas de la IDESC.

Finalmente, la tabla 10 resume los valores estadísticos obtenidos por cada variable independiente de la infraestructura vial, las cuales servirán de entrada para el modelo de regresión geográficamente ponderado. Además, se aprecia que las variables número de intersecciones semaforizadas (NoIS), número de puntos parada MIO (NoPPM), número de lotes con uso residencial (NoLotRes) y número de lotes con uso mixto (NoLotMix) tienen un valor mínimo de cero, dado que hay barrios que no cuentan con entidades para esas variables.

Tabla 10. Resumen de estadísticas de las variables utilizadas

Variable	Min	Max	Rango	Media	Varianza	S.D	Asimetría	Curtosis	Moran
APxBarrio	0.00	42.00	42.00	7.51	64.29	8.02	1.80	3.31	0.29
GI	0.04	1.19	1.15	0.60	0.06	0.25	-0.23	-0.57	0.34
CE	0.05	0.67	0.62	0.16	0.01	0.11	64.85	1.89	0.26
NoIS	0.00	22.00	22.00	1.43	5.78	2.40	4.01	24.17	0.37
NoPPM	0.00	115.00	115.00	11.11	187.24	13.68	2.97	14.77	0.25
Vel	9.30	28.05	18.75	16.10	8.40	2.90	0.53	0.74	0.11
NoLotRes	0.00	287.00	287.00	42.12	1895.60	43.54	2.07	5.58	0.32
NoLotMix	0.00	96.00	96.00	12.42	198.50	14.09	2.39	8.73	0.27

6.3 RELACIÓN ENTRE LOS ACCIDENTES PEATONALES Y LAS CARACTERÍSTICAS DE INFRAESTRUCTURA VIAL

En el presente estudio se exploró la relación entre los accidentes peatonales y las características de la infraestructura vial de Santiago de Cali a partir de un modelo de regresión geográficamente ponderado. Sin embargo, previo a la construcción del modelo se realizó un proceso de selección de variables a partir de una matriz de correlación (figura 44) con el fin de reconocer cuáles variables podrían relacionarse mejor con el número de accidentes peatonales (variable dependiente) y cuáles no tienen multicolinealidad. Por tanto, se analizó el tipo de distribución que tienen las variables seleccionadas (tabla 11) a partir de la prueba Shapiro-Wilk (ecuación 10). Posteriormente, se elaboró una matriz de correlación de spearman (ecuación 11), la cual muestra el nivel de significancia de la correlación entre cada variable, es decir que toda variable con un p-value superior al nivel de significancia (0.05) se señaló con una equis (x) en la matriz.

Tabla 11. Resultados prueba de Shapiro-Wilk para determinar distribución normal de variables

Variable	Nombre	Shapiro-Wilk test	p-value	Distribución normal
APxBarrio	Número accidentes peatonales	0.79969	$<2.2e^{-16}$	no
GI	Índice de integración global	0.98281	0.00050	no
CE	Índice centralidad entre redes	0.81421	$<2.2e^{-16}$	no
NoIS	Número de intersecciones semaforizadas	0.59799	$<2.2e^{-16}$	no
NoPPM	Número de puntos de parada MIO	0.73204	$<2.2e^{-16}$	no
Vel	Velocidad promedio	0.98279	0.00049	no
NoLotRes	Número de lotes con uso residencial	0.79681	$<2.2e^{-16}$	no
NoLotMix	Número de lotes con uso mixto	0.7775	$<2.2e^{-16}$	no

En la figura 44 se muestra que el índice de centralidad entre redes, el número de intersecciones semaforizadas, el número de puntos de parada MIO y el número de lotes con uso mixto, son las variables que tienen una correlación significativa con el número de accidentes peatonales.

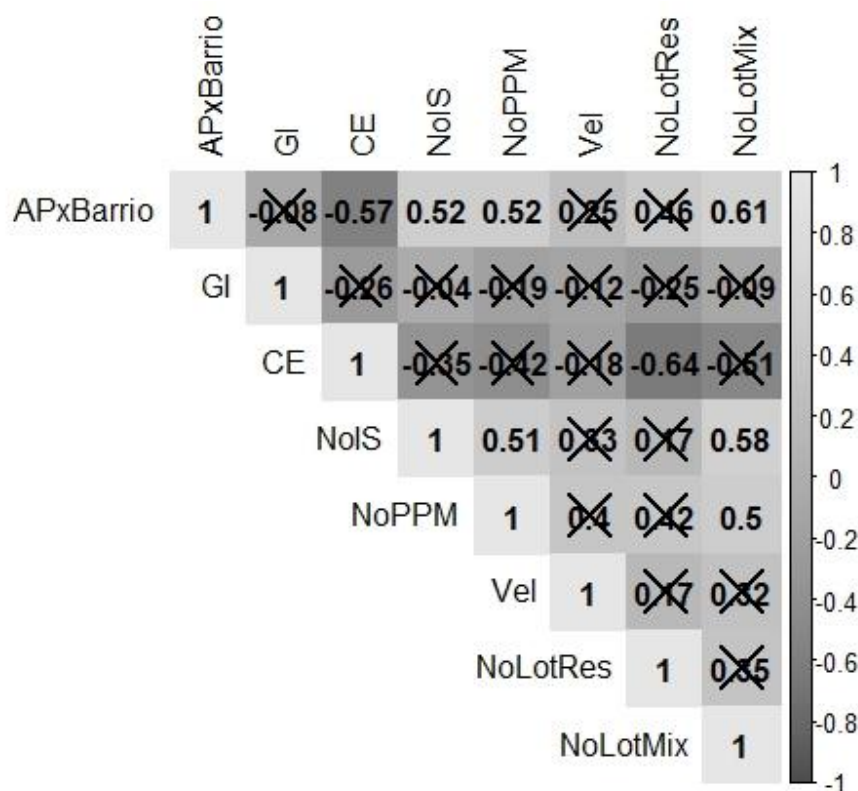


Figura 44. Matriz de correlación.

A su vez, se observa en la matriz que el índice de centralidad entre redes no se correlaciona con ninguna de las otras tres variables. Por el contrario, el número de intersecciones semaforizadas presenta correlación con el número de puntos de parada MIO ($R = 0.51$) y el número de lotes con uso Mixto ($R = 0.58$), indicando la presencia de multicolinealidad para un posible modelo. Así mismo, el número de puntos de parada MIO presenta correlación con el número de lotes con uso Mixto ($R = 0.50$). Como resultado, la tabla 12 muestra las posibles combinaciones de variables que cumplen con los criterios de construcción del modelo (correlación con la variable dependiente y la no presencia de multicolinealidad entre las variables independientes).

Tabla 12. Combinaciones resultantes de variables a partir de matriz de correlación

Modelo	Variable dependiente	Variables independientes
M1	APxBarrio	CE + NoIS
M2	APxBarrio	CE + NoPPM
M3	APxBarrio	CE + NoLotMix

Posteriormente, se procede a calcular un modelo lineal generalizado (GLM) para cada una de las combinaciones resultantes por medio de la regresión de Poisson, ya que la variable del número de accidentes peatonales por barrios es de tipo conteo y dicha regresión es comúnmente utilizada para este tipo de variables (Li, Wang, Liu, Bigham, & Ragland, 2013). Como resultado se obtuvo que el modelo M3 es el que mejor rendimiento tiene respecto a los modelos M1 y M2 (tabla 13), dado que tiene los mejores valores de desviación, AICc y porcentaje de desviación explicado. Por tanto, se selecciona el modelo M3 (combinación de variables del índice de centralidad entre redes y el número de lotes con uso mixto) con el fin de analizar el fenómeno de los accidentes peatonales en Santiago de Cali.

Tabla 13. Rendimiento de modelos

Modelo	Variable dependiente	Variables independientes	Desviación	AICc	% Desviación explicado
M1	APxBarrio	CE + NoIS	1,564.05	1,570.13	0.35
M2	APxBarrio	CE + NoPPM	1,656.86	1,662.86	0.31
M3	APxBarrio	CE + NoLotMix	1,391.05	1,397.13	0.43

En la tabla 14 se observa que los coeficientes de la variable de centralidad entre redes (CE) y el número de lotes de uso de suelo mixto (NoLotMix) son significantes, ya que el p-value de cada una es inferior al nivel de significancia, es decir que cuentan con un intervalo de confianza del 95%, el cual es tolerable en este estudio. Por otra parte, el valor de desviación (1,391.05) del modelo es superior al valor esperado (375.49), este valor se calculó a partir de sus grados de libertad (333) e intervalo de confianza (95%). En consecuencia, se puede inferir que el modelo GLM no se ajusta bien y se confirma mediante el porcentaje de desviación explicado = 0.43, el cual solamente representa un 43% de la variación de los datos.

Tabla 14. Resultados modelo GLM (Regresión de Poisson) para M3

Variable	Coefficiente	Error estándar	p-value
Intercepto	2.296711	0.051870	2.0×10^{-16}
CE	-4.670283	0.313738	2.0×10^{-16}
NoLotMix	0.022291	0.000943	2.0×10^{-16}
Desviación		1391.06	
AICc		1397.13	
Porcentaje de desviación explicado		0.43	
Índice de Moran de residuales		0.187	

Por otra parte, se analizaron los residuales del modelo GLM (Regresión de Poisson) para M3 a partir del índice de Moran (figura 45), el cual obtuvo un valor de 0.187. Esto quiere decir que los residuales tienen una autocorrelación espacial positiva. Además, se calculó con test de significancia con 999 permutaciones que muestra un p-value de 0.001, es decir que la distribución espacial de los residuales del modelo GLM no es aleatoria. Como resultado, se observa que los residuales presentan agrupaciones (clústeres) a nivel de barrios sobre la ciudad de Santiago de Cali (figura 46). Esto se calculó por medio del índice de Moran local, obteniendo que las zonas centro, oriente y sur tienen asociaciones con un nivel de significancia entre $p=0.001(4)$, $p=0.01(18)$ y $p=0.05(44)$.

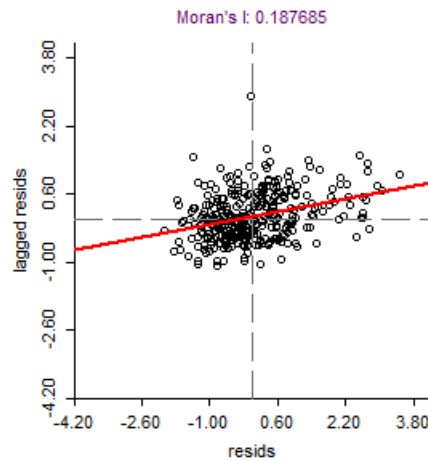


Figura 45. Índice de Moran para residuales del modelo GLM

Debido a que los residuales no tienen un comportamiento aleatorio, el modelo GLM no es adecuado para representar el fenómeno de los accidentes peatonales en Santiago de Cali. Esto se debe a que el modelo es global y parte del supuesto que las estimaciones son estáticas (no tienen variación espacial). Además, el modelo presenta un valor de desviación superior al esperado en un modelo ajustado (375.49) y no supera el 50% de explicación del modelo. En consecuencia, se decide implementar el modelo GWPR, el cual tiene en cuenta la variación espacial del fenómeno y es un modelo de tipo local que permite calcular un coeficiente por cada barrio de la ciudad. Sin embargo, antes de implementar el GWPR se calculó el bandwith óptimo, el cual se obtuvo de forma automática por medio de la opción *Golden section search* (sección 4.3.3.) del software *GWR4*®. Este proceso obtuvo como resultado un valor de 46 unidades espaciales para el bandwith, valor que sirve como entrada para que el modelo de regresión geográficamente ponderado (GWPR) tenga un mejor rendimiento al adaptarse a la variación espacial de los accidentes peatonales por barrio.

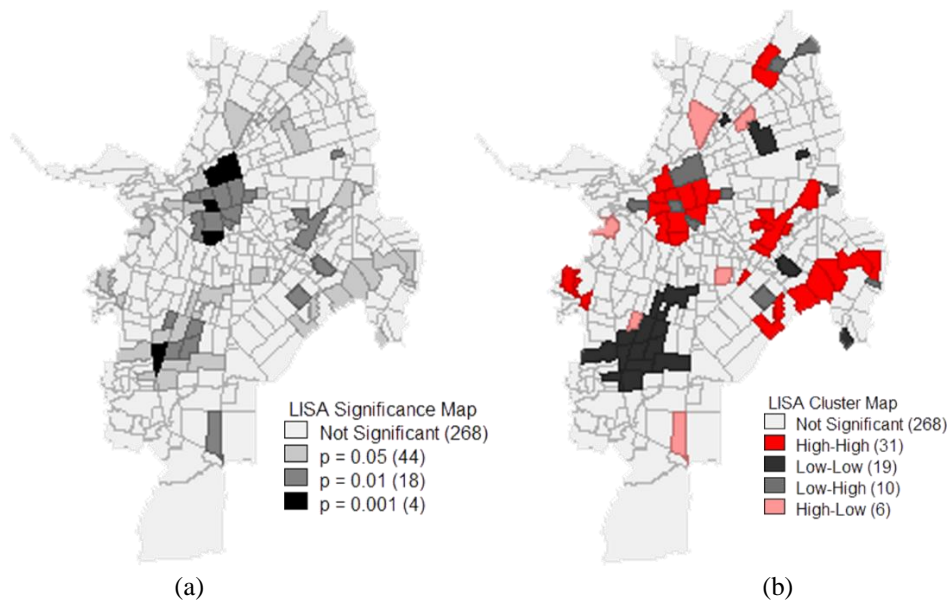


Figura 46. Mapa de significancia (a) y clusters (b) de los residuales obtenidos en el modelo GLM
Fuente: Elaboración propia con datos de áreas de actividad de Santiago de Cali obtenidas de la IDESC

En la tabla 15 se observa que los coeficientes del modelo son calculados para cada barrio de Santiago de Cali, es decir que no se obtiene un solo coeficiente a nivel global, sino que existe un coeficiente del modelo para cada barrio de la ciudad. Estos valores muestran que el índice de centralidad entre redes se relaciona con el número de accidentes peatonales de forma negativa a excepción del 11.0%(37) de los barrios que cuentan con valores positivos. Por tanto, se observa que existen signos contra-intuitivos (varían de negativo a positivo y viceversa) en los resultados del modelo GWPR, los cuales se presentan comúnmente en este tipo de modelos debido a que en algunas zonas las hipótesis de las variables no se cumplen y existe sobre-dispersión de los datos (Timbo et.al, 2017). Por otra parte, el número de lotes de uso de suelo mixto tiene un signo positivo a excepción del 0.8%(3) de los barrios, los cuales cuentan con signos negativos. En conclusión, se afirma que la relación es positiva entre el número de accidentes peatonales y el número de lotes con uso de suelo mixto.

Tabla 15. Resultados modelo GWPR

Variable	Mínimo	1Q	Media	3Q	Máximo
Intercepto	0.754446	1.557065	2.087157	2.570900	3.731206
CE	-16.056453	-6.585042	-4.410330	-2.224819	2.329857
NoLotMix	-0.005876	0.018594	0.028632	0.037822	0.067658
Desviación	811.69				
AICc	934.78				
Porcentaje de desviación explicado	0.66				
Índice de Moran de residuales	-0.018				

En cuanto a la desviación del modelo se puede decir que se redujo 41.6% en comparación con la obtenida en el GLM, es decir que el GWPR se acerca más al modelo ajustado. Esto lo demuestra el porcentaje de desviación explicado que representa un 0.66% de la variación de los datos, el cual es superior al obtenido por GLM. Así mismo, al comparar el indicador de AICc se observa una reducción del 33.1%. También se muestra que el índice de Moran calculado para los residuales del modelo GWPR presenta un comportamiento aleatorio (figura 47), ya que tiene un valor de -0.018 y su distribución espacial muestra dicho patrón (figura 48). Por otra parte, se implementó una prueba de variabilidad geográfica (tabla 16) que evalúa la variación espacial del fenómeno por cada variable que compone el modelo (Nakaya, 2016).

Tabla 16. Resultados de prueba de variabilidad geográfica

Variable	Diferencia del Criterio (AICc)
Intercepto	-143.64
CE	-79.54
NoLotMix	-119.27

Como se observa en la tabla 16, el modelo GWPR cuenta con variación espacial en cada una de sus variables, ya que todas tienen un valor de diferencia de criterio negativo y son superiores al umbral (-4 a 4) que plantea (Nakaya, 2016). En consecuencia, se puede afirmar que el modelo GWPR si considera la variación espacial para representar el fenómeno de los accidentes peatonales.

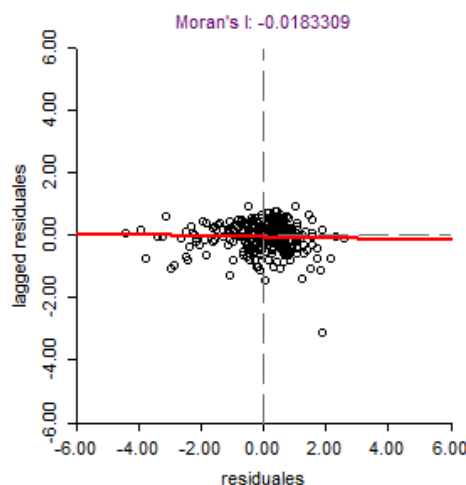


Figura 47. Reporte de autocorrelación espacial GWPR

Los resultados obtenidos del modelo GWPR sugieren que el índice de centralidad entre redes es mejor estimador en los barrios del occidente, centro y oriente de la ciudad, los cuales están representados con las tonalidades oscuras en la figura 49. Así mismo, se observa que la relación que tiene el índice de centralidad entre redes y el número de accidentes peatonales es negativa en el 89% (297) de los barrios, es decir que entre menor sea el índice de centralidad entre redes (patrón de red vial tipo regular), mayor será el número de accidentes peatonales y viceversa. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el 11%(37) de los barrios tienen un coeficiente positivo entre los accidentes peatonales y el índice de centralidad entre redes. Esto se debe probablemente a que en dichos barrios la hipótesis entre estas dos variables no se cumple o por la sobre-dispersión de los datos de accidentes (Timbó et.al, 2017).

Los barrios de la ciudad que cuentan con los valores más altos del índice de centralidad entre redes son los barrios del occidente, los cuales tienen un patrón de grilla irregular y los valores más bajos de accidentes peatonales. En contraste con los barrios del centro y oriente de la ciudad que cuentan con valores bajos de centralidad entre redes, es decir que poseen un patrón de red vial de tipo grilla y los valores más altos de accidentalidad en peatones. Esto se debe a que en los patrones de tipo grilla existen más intersecciones donde los peatones interactúan con los vehículos y entran en conflicto.

En relación al número de lotes con uso de suelo mixto se puede afirmar que es mejor estimador en los barrios del centro, oriente y sur de la ciudad. Esto se observa en la figura 50 donde los barrios se representan con tonalidades oscuras, así mismo, se muestra que la relación entre el uso de suelo mixto y el número de accidentes peatonales es positiva en el 99% (331) de los barrios, es decir que los barrios que cuentan con un número alto de lotes con uso de suelo mixto, tienden a tener un número alto de accidentes peatonales. En contraste, el 1% (3) de los barrios tienen un coeficiente negativo, posiblemente a que en dichos barrios la hipótesis entre los accidentes peatonales y el número de lotes con uso de suelo mixto no se cumple o presenta sobre-dispersión los datos, una situación semejante a la ocurrida con el índice de centralidad entre redes.

En general, los barrios del centro son los que cuentan con mayor oferta de actividades, por tanto, el uso del suelo mixto asciende y con este el número de accidentes peatonales. Al mismo tiempo, los barrios del oriente cuentan con niveles altos en el número de lotes con uso mixto, lo que se traduciría

en un nivel alto de accidentes peatonales. Esto se debe probablemente a que la presencia de peatones en estas zonas aumenta debido a la oferta de actividades del uso de suelo mixto, lo cual genera más conflictos entre los vehículos y estos actores en la vía.

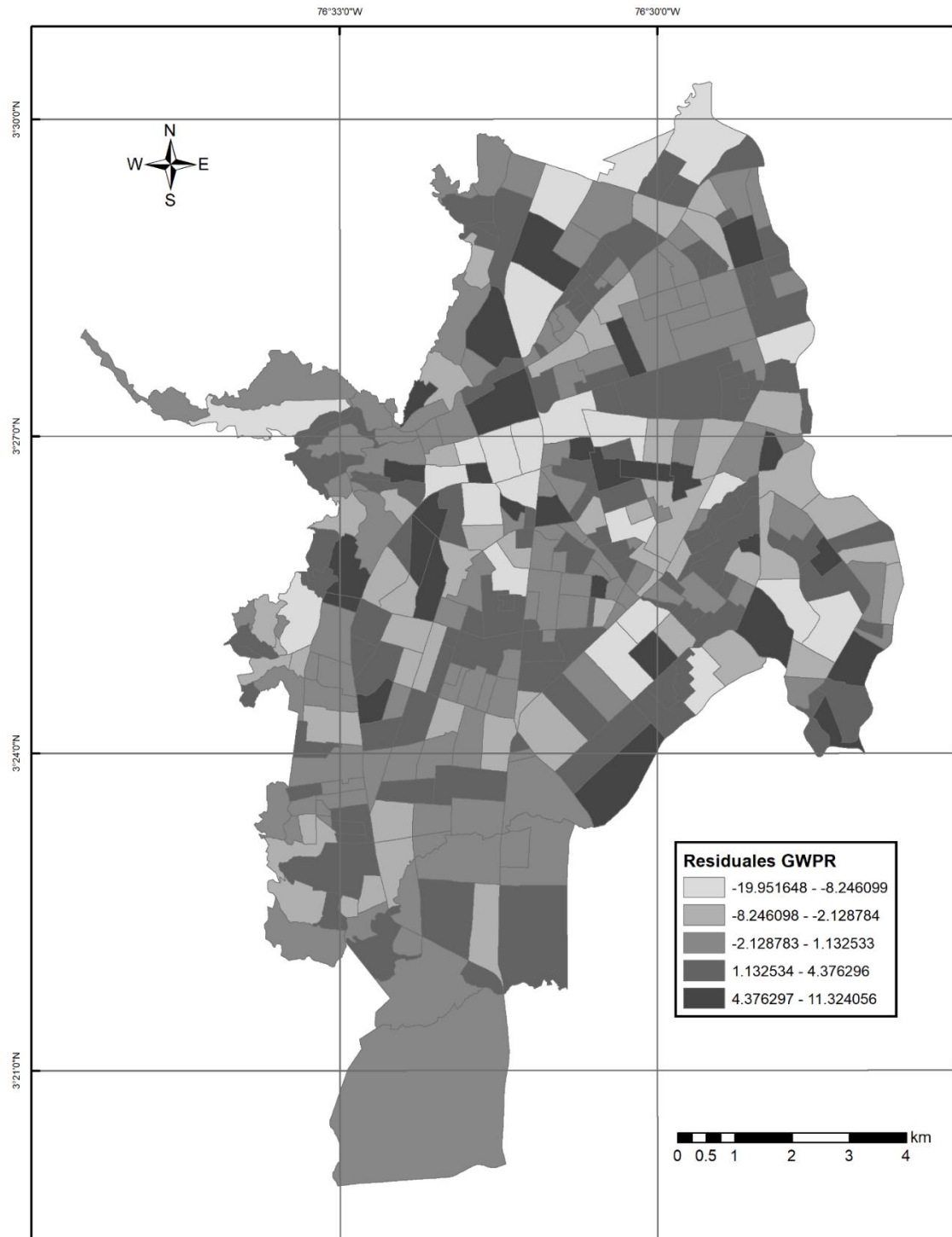


Figura 48. Mapa de distribución espacial de residuales del modelo GWPR

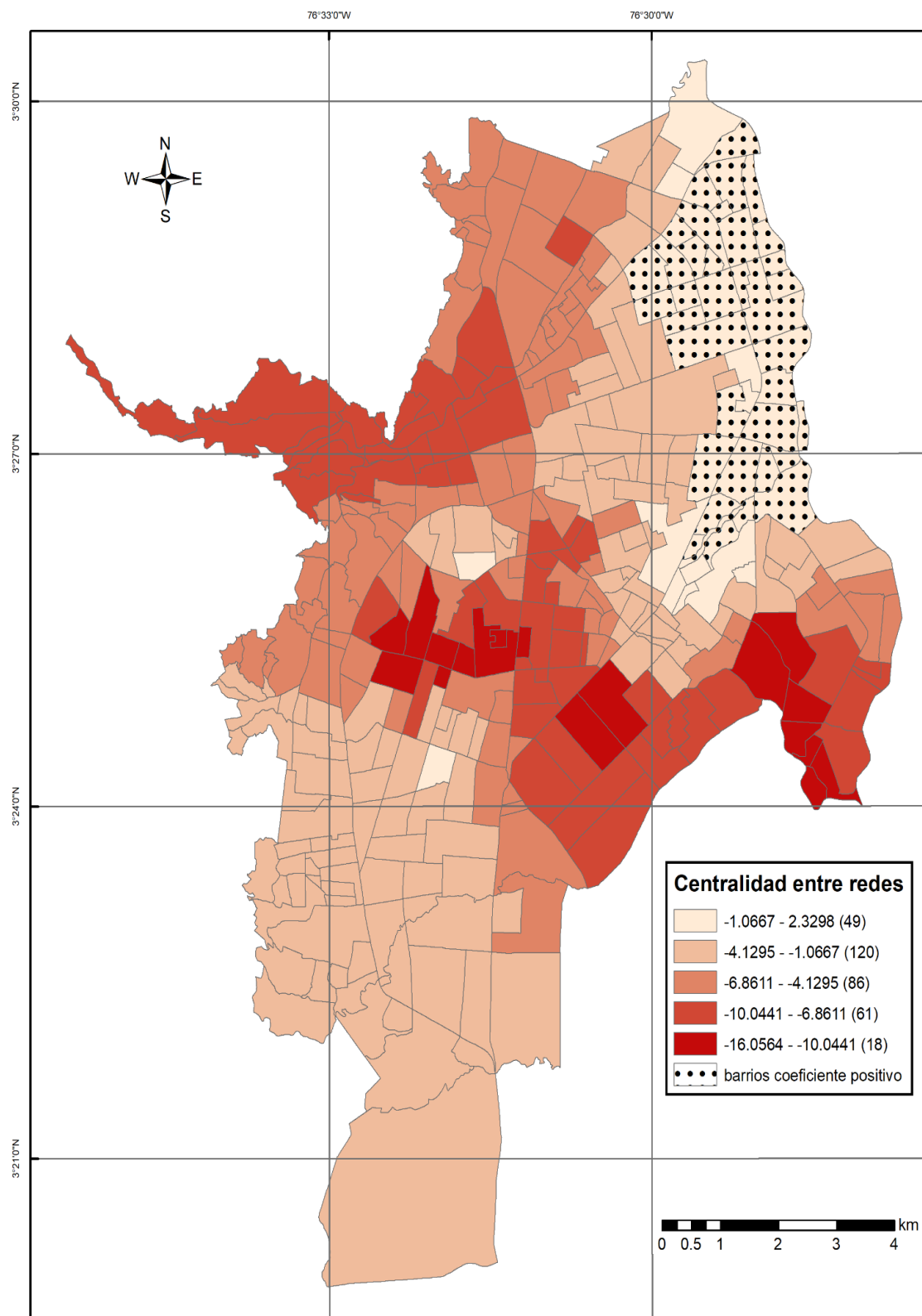


Figura 49. Coeficientes estimados para el índice de centralidad de redes con el modelo GWPR

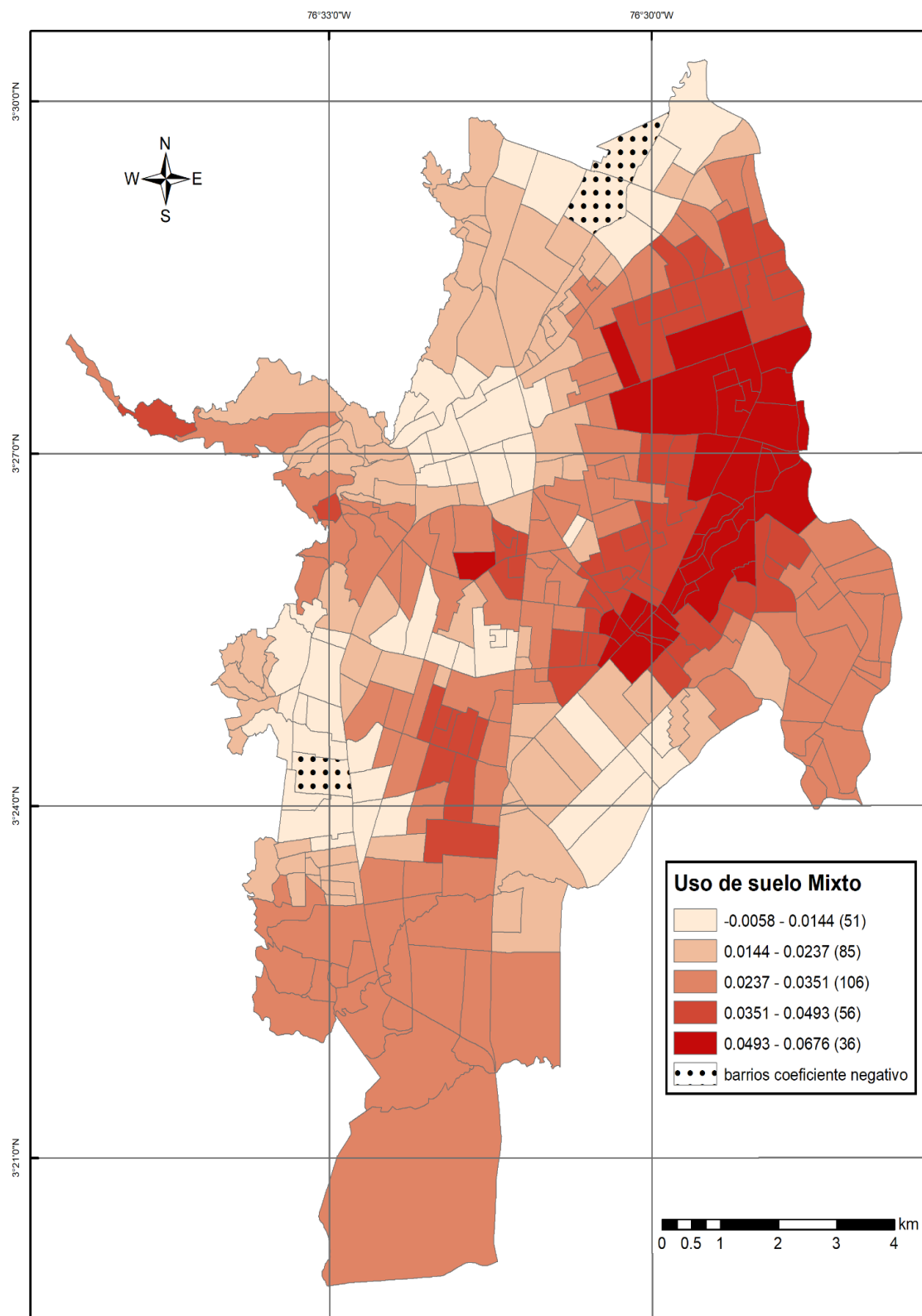


Figura 50. Coeficientes estimados para número de lotes con uso mixto con el modelo GWPR

7. CONCLUSIONES

- La caracterización de los accidentes peatonales en la ciudad de Santiago de Cali durante los años 2008-2013 muestra que la distribución espacial de los accidentes responde a una configuración espacial con autocorrelación positiva. Es decir que los barrios se agrupan con otros que tengan niveles de accidentes peatonales semejantes, como es el caso de las zonas oriental y centro de la ciudad que poseen los niveles más altos de accidentes peatonales. En contraste con la zona occidental donde se presentan bajos niveles de accidentes peatonales.
- La severidad de los accidentes peatonales indica que el 23% de los peatones involucrados han muerto, con una media de 97 muertes por año; el 77% representa el porcentaje de peatones lesionados con una media de 322 lesionados por año. A su vez, los peatones adultos y adultos mayores han sido los grupos de edad que mayor participación han tenido en los accidentes peatonales, además, se observó que los hombres tienen un 56% de participación en los accidentes, un valor mayor al reportado por las mujeres con un 44% de los casos. En cuanto al nivel de escolaridad de los peatones se evidenció que el nivel de básica primaria ha sido el de mayor proporción con un 36% de los casos. Finalmente, las motocicletas han sido los vehículos que más estuvieron involucrados con los accidentes peatonales, estos vehículos registraron un 44,5% del total de accidentes.
- En cuanto a la infraestructura vial de la ciudad se puede decir que los barrios con patrones de red regular se encuentran en las zonas centro y oriente de la ciudad, así mismo, los barrios con patrón de red de tipo irregular están ubicados al occidente de la misma en el sector de la ladera y los patrones de red vial de tipo grilla deforme se encuentran principalmente en las zonas norte y sur. Por otra parte, se observa que los barrios del centro son los que cuentan con mayor número de intersecciones semaforizadas, posiblemente, debido a que en estos barrios existen más actividades y flujos vehiculares. Así mismo, los puntos de parada MIO muestran agrupaciones en las zonas oriente y sur de la ciudad. Por último, la operación vial se observó a partir de la velocidad promedio de cada barrio, la cual muestra algunas concentraciones con nivel alto de velocidad en las zonas oriente y sur de la ciudad.
- El modelo GWPR es implementado para explicar el fenómeno de los accidentes peatonales, ya que es útil para datos de conteo como los utilizados en este estudio. Además, se obtuvo mejor rendimiento con este modelo al tener en cuenta la variación espacial del fenómeno, es decir que estima de forma local (no-estáticos) los coeficientes que componen el modelo y no determina unos coeficientes a nivel global (estáticos). En este sentido, el modelo GWPR redujo en 42% la desviación en comparación con el modelo GLM.
- Se puede afirmar que existe una relación significativa entre el índice de centralidad entre redes, el número de lotes con uso de suelo mixto y los accidentes peatonales en Santiago de Cali. El modelo GWPR con estas variables representó en un 66% el fenómeno, sin embargo, se debe seguir explorando con otros modelos que tengan en cuenta la sobre-dispersión de los datos y probablemente eviten los coeficientes con signos contra-intuitivos. Además, se debe analizar otro tipo de variables relacionadas con los flujos vehiculares y el comportamiento humano.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Abojaradeh, M. (2013). Evaluation of Pedestrian Bridges and Pedestrian Safety in Jordan. *Civil and Environmental Research*, 3, 66-78.
- Aguero-Valverde, J., & Jovanis, P. (2008). Analysis of Road Crash Frequency with Spatial Models. *Transportation Research Record Journal*, 55-63.
- Alvarez, A., & Lopez, P. A. (2014). Evaluar el Efecto de la Implementacion de la Señalización Vial en Cinco Zonas Escolares de Bogota (Trabajo de Grado). *Pontificia Universidad Javeriana*, 1-147.
- Anderson, D., Sweeney, D., & Williams, T. (2008). *Estadística para administración y economía*. México D.F.: Thomson/Southwestern.
- Bafna, S. (2003). Space Syntax: A brief introduction to its logic and analytical techniques. *Environment and Behavior*, 35, 17-29.
- Buzai, G., & Baxendale, C. (2006). *Análisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica*. Buenos Aires : Lugar Editorial S. A.
- Chandra, S., Rastogi, R., & Das, V. R. (2014). Descriptive and Parametric Analysis of Pedestrian Gap Acceptance in Mixed Traffic Conditions. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18, 284-293.
- Chen, C., Lin, H., & Loo, B. P. (2011). Exploring the Impacts of Safety Culture on Immigrants' Vulnerability in Non-motorized Crashes: A Cross-sectional Study. *Bulletin of the New York Academy of Medicine*, 89, 138-152.
- DAP. (01 de Enero de 2016). *Cali en Cifras*. Obtenido de Departamento Administrativo de Planeación: http://www.cali.gov.co/publicaciones/107143/cali_en_cifras_planeacion/
- DAPM. (2017, Marzo 1). *Plan Integral de Movilidad Urbana de Santiago de Cali (Diagnóstico)*. Retrieved from Departamento Administrativo de Planeación Municipal: <http://planeacion.cali.gov.co/pimu/>
- Dumbaugh, E., & Zhang, Y. (2013). The Relationship between Community Design and Crashes Involving Older Drivers and Pedestrians. *Journal of Planning Education and Research*, 33, 83-95.
- ElPais. (2015, Junio 17). *Conozca los sitios campeones en accidentalidad vial en Cali*. Retrieved from El Pais.com: <http://www.elpais.com.co/cali/conozca-los-sitios-campeones-en-accidentalidad-vial-en.html>
- Florez, C., & Patiño, C. (2014). Identification of the main risk factors for vulnerable non-motorized users in the city of Manizales and its relationship with the quality of road infrastructure. *Social and Behavioral Sciences*, 162, 359-367.
- Freeman, L. (1979). Centrality in social networks: conceptual clarification. *Social Net*, 215-239.

- Gatrell, A., Trevor Bailey, P. D., & Rowlingson, B. (1996). Spatial point pattern analysis and its application in geographical epidemiology. *Royal Geographical Society*, 21, 256-274.
- Guo, Q., Xu, P., Pei, X., Wong, S., & Yao, D. (2017). The effect of road network patterns on pedestrian safety: A zone-based Bayesian spatial modeling approach. *Accident Analysis and Prevention*, 99, 114 - 124.
- Hillier, B., & Hanson, J. (1984). *The Social Logic of Space*. UK: Cambridge University Press.
- INMLC. (2016). *Forensis (Informe)*. Bogota D.C: Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses.
- INMLCF. (2015). *Forensis (Informe)*. Bogota D.C: Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses.
- Lam, W., Yao, S., & Loo, B. (2014). Pedestrian exposure measures: A time-space framework. *Travel Behaviour and Society*, 1, 22-30.
- Li, Z., Wang, W., Liu, P., Bigham, J., & Ragland, D. (2013). Using Geographically Weighted Poisson Regression for county-level crash modeling in California. *Safety Science*, 58, 89–97.
- Lizarraga, C. (2006). Movilidad Urbana Sostenible: Un Reto para las Ciudades del Siglo XXI. *Economía, Sociedad y Territorio*, 6, 283-321.
- Marshall, W., & Garrick, N. (2011). Does street network design affect traffic safety? *Accident Analysis and Prevention*, 43, 769-781.
- Medina, J. (2015). Factores de a infraestructura vial y entorno ambientales asociados con la morbi-mortalidad de peatones por eventos de transito ocurridos en santiago de cali 2009 (Trabajo de Grado). *Universidad del Valle*, 1-55.
- Miranda-Moreno, L., Morency, P., & Geneidyc, A. (2011). The link between built environment, pedestrian activity and pedestrian–vehicle collision occurrence at signalized intersections. *Accident Analysis and Prevention*, 43, 1624-1634.
- Moudon, A. V., Lin, L., JiaoM, J., Hurvitz, P., & Reeves, P. (2011). The risk of pedestrian injury and fatality in collisions with motor vehicles, a social ecological study of state routes and city streets in King County, Washington. *Accident Analysis and Prevention*, 43, 11-24.
- Nakaya, T. (2016). *GWR4 Windows application for geographically weighted regression modelling*. Kyoto: Ritsumeikan University.
- OMS. (2015). *Informe sobre la situación Mundial de la Seguridad Vial*. Paris: Organización Mundial para la Salud.
- OMSSV. (2016). *Boletín Anual de Eventos de Tránsito*. Santiago de Cali: Observatorio de Movilidad Sostenible y Seguridad Vial.
- OMSSV. (2017). *Siniestralidad de Peatones*. Santiago de Cali: Observatorio de movilidad sostenible y seguridad vial.

- OPS. (2016). *La Seguridad Vial en la región de las Américas*. Washintong DC: Organizacion Panamericana de la Salud.
- Pulugurtha, S., Vanjeeswaran, & Krishnakumar. (2007). New methods to identify and rank high pedestrian crash zones: An illustration. *Accident Analysis and Prevention*, 39, 800-811.
- Reina, C., & Rojas, C. (2016). Determinación de las zonas críticas a la atención de víctimas severas de accidentes de tránsito entre el punto del evento y el centro asistencial (Trabajo de Grado). *Universidad del Valle*, 1-63.
- Shapiro, S. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52 , 591-611.
- Siddiquia, C., Abdel-Atya, M., & Choi, K. (2012). Macroscopic spatial analysis of pedestrian and bicycle crashes. *Accident Analysis and Prevention*, 45, 382 - 391.
- Silverman, B. (1986). *Density estimation for statistics and data analysis*. New York: Chapman and Hall.
- Timbó, M., Cuntoa, F., & da-Silva, A. (2017). Geographically weighted negative binomial regression applied to zonal level safety performance models. *Accident Analysis and Prevention*(106).
- Vieira, S. (2013). The influence of the infrastructure characteristics in urban road accidents. *Accident Analysis and Prevention*, 60, 289-297.
- Yao, S., Loo, B., & Lam, W. (2015). Measures of activity-based pedestrian exposure to the risk of vehicle-pedestrian collisions: Space-time path vs. potential path tree methods. *Accident Analysis and Prevention*, 75, 320-332.
- Zhang, Y., Bigham, J., Li, Z., & Ragland, D. (2012). Associations between Road Network Connectivity and Pedestrian-Bicyclist Accidents. *TRB Annual Meeting*, 1-18.
- Zhang, Y., Bigham, J., Ragland, D., & Chen, X. (2015). Investigating the associations between road network structure and non-motorist accidents. *Journal of Transport Geography*, 42, 34-47.